



Fachhochschule Köln  
Cologne University of Applied Sciences



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.

Fachhochschule Köln

Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien

---

# Bachelorarbeit

von

**Fabian Schmitz**

Matrikel-Nr.: 11075883

**Auslegung und Inbetriebnahme des Wasserkreislaufs eines  
Sonnensimulatorprüfstandes zum Vergleich des optischen  
Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern**

**Developing and commissioning the water circulation of a solar  
simulator test bench for comparing the optical efficiency of  
parabolic trough receivers**

---

Referent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Jürgen Lambers

Korreferent: Dipl.-Ing. Christoph Happich (DLR)

Ausgabe: 11.08.2014

Abgabe: 13.10.2014

Registrier-Nr.: BA 224/14

Durchgeführt am

Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e. V. Köln

# **Auslegung und Inbetriebnahme des Wasserkreislaufs eines Sonnensimulatorprüfstandes zum Vergleich des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern**

## **Developing and commissioning the water circulation of a solar simulator test bench for comparing the optical efficiency of parabolic trough receivers**

Registrier-Nr.: BA 224/14

von

**Fabian Schmitz**

am

Institut für Landmaschinentechnik und Regenerative Energien der FH Köln

in Zusammenarbeit mit dem

Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e.V. Köln

Abgabe: 13.10.2014

Referent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Jürgen Lambers

Korreferent: Dipl.-Ing. Christoph Happich (DLR)

Keywords: Solarenergie, Solarthermische Kraftwerke, Parabolrinnenreceiver,  
Receiverhalterung, Wasserkreislauf, Rückkühlung, Temperaturkonstanz

### **Kurzfassung**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Wasserkreislauf eines Sonnensimulatorprüfstands konzipiert, der zur Verringerung des Wasserverbrauchs und zur Steigerung der Temperaturkonstanz dient. Diese Arbeit beinhaltet die Erstellung des Konzepts, die Auslegung der einzelnen Komponenten, die Umsetzung, sowie eine erste Inbetriebnahme dieses Wasserkreislaufs. Die dabei aufgenommenen Messwerte werden aufgearbeitet und als Ergebnis anhand der geforderten Grenzwerte diskutiert. Die Überwachung und Ansteuerung der einzelnen Prüfstandskomponenten per Computer wird implementiert. Eine Validierung des Prüfstands zur Überführung in den Messbetrieb ist in dieser Arbeit nicht enthalten. Des Weiteren wird per CAD die Receiverhalterung im Hinblick auf verbesserte Bedienbarkeit, Möglichkeiten zur Erweiterung, geringeren Verschleiß und reduzierte Fertigungskosten überarbeitet und anschließend realisiert.

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur .....	III
1 Einleitung .....	- 1 -
1.1 Motivation und Zielsetzung .....	- 2 -
1.2 Aufbau der Arbeit .....	- 3 -
2 Grundlagen .....	- 4 -
2.1 Physikalische Grundlagen .....	- 4 -
2.2 Prüfstandskomponenten .....	- 6 -
2.3 Konzentrierende Solarthermie .....	- 8 -
2.4 Linienfokussierendes System Parabolrinnenkraftwerk .....	- 9 -
2.5 Parabolrinnenreceiver .....	- 11 -
2.6 Stand der Technik .....	- 13 -
2.6.1 Elliptischer Receiverprüfstand - ElliRec .....	- 13 -
2.6.2 Optischer Receiverprüfstand - OptiRec .....	- 16 -
2.6.3 Halterung für Parabolrinnenreceiver .....	- 18 -
3 Neukonstruktion der Receiverhalterung .....	- 22 -
3.1 Umzusetzende Anforderungen .....	- 22 -
3.2 Entwicklungsprozess .....	- 23 -
4 Entwicklung des Wasserkreislaufs .....	- 31 -
4.1 Umzusetzende Anforderungen .....	- 31 -
4.2 Konzeptionierung .....	- 32 -
4.3 Auswahl der Komponenten .....	- 35 -
4.4 Aufbau und Inbetriebnahme .....	- 41 -
4.4.1 Aufbau und Anschluss der Komponenten .....	- 41 -
4.4.2 Sicherheitsvorkehrungen .....	- 41 -
4.4.3 Inbetriebnahme .....	- 42 -
4.4.4 Ansteuerung - Hardware und Software .....	- 43 -
4.5 Ergebnisse .....	- 47 -
5 Fazit und Ausblick .....	- 50 -
Zusammenfassung .....	- 53 -
Anhang .....	- 54 -
Literaturangaben .....	- 55 -

## Nomenklatur

### Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$A$	Querschnittsfläche	$m^2$
$A_S$	Erforderlicher Spannungsquerschnitt	$mm^2$
$c$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	$m/s$
$c_{max}$	Maximaler Konzentrationsfaktor	—
$c_{max,einachs\,ig}$	Maximaler Konzentrationsfaktor bei einachsiger Nachführung	—
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität	$J/kg \cdot K$
$f$	Brennweite	$m$
$F$	Kraft	$N$
$h$	Spezifische Enthalpie	$J/kg$
$m$	Masse	$kg$
$\dot{m}$	Massenstrom	$kg/h$
$n$	Anzahl der Zahlenwerte	—
$p$	Druck	$Pa$
$\dot{Q}_{abs}$	Absorbierter Wärmeleistung	$W$
$\dot{Q}_K$	Konvektiver Wärmestrom	$W$
$\dot{Q}_S$	Strahlungsenergie	$W$
$T$	Temperatur	$^{\circ}C$
$V$	Volumen	$m^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$m^3/h$
$Var(x)$	Varianz	—
$\bar{x}_{arithm}$	Arithmetischer Mittelwert	—
$x_n$	Zahlenwert	—

**Griechische Symbole**

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$\alpha$	Absorptionsgrad	—
$\gamma$	Interceptfaktor	—
$\Delta$	Änderung	—
$\eta_c$	Carnot-Wirkungsgrad	—
$\vartheta$	Temperatur	$K$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$\rho$	Reflexionsgrad	—
$\sigma$	Standardabweichung	—
$\sigma_{z(d)zul}$	Zulässige Zug-(Druck-)Spannung	$N/mm^2$
$\tau$	Transmissionsgrad	—

**Indizes**

Symbol	Bezeichnung
1	An Punkt 1, in Strang 1
2	An Punkt 2, in Strang 2
3	An Punkt 3, in Strang 3
<i>ges</i>	Gesamt-
<i>in, Ein</i>	Eintritts-
<i>max, h</i>	Maximal-, höchste/r/s
<i>min, n</i>	Minimal-, niedrigste/r/s
<i>out, Aus</i>	Austritts-
<i>Tank</i>	Tank-, im Tank

# 1 Einleitung

Durch die Mischung von weltweit stetig ansteigendem Energiebedarf bei gleichzeitig schwindenden fossilen Energieträgern und immer gravierenderen Auswirkungen des globalen Klimawandels aufgrund von Treibhausgasen, ist eine Transformation der Energieversorgung hin zu erneuerbaren Energien unumgänglich. Energielieferanten wie Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran müssen aufgrund steigender Ressourcenknappheit in Zukunft von regenerativen Quellen wie Wind, Wasser, Biomasse und der Sonne abgelöst werden. Dies veranschaulicht die folgende Abbildung 1.1 sehr deutlich, da sie zum einen zeigt, dass das jährliche regenerative Energieangebot das gesamte Vorkommen an konventionellen Energieträgern um ein vielfaches übersteigt. Zum anderen ist ersichtlich wie ausreichend und nachhaltig der weltweite Primärenergiebedarf auch allein durch alternative Energiequellen abgedeckt werden kann.

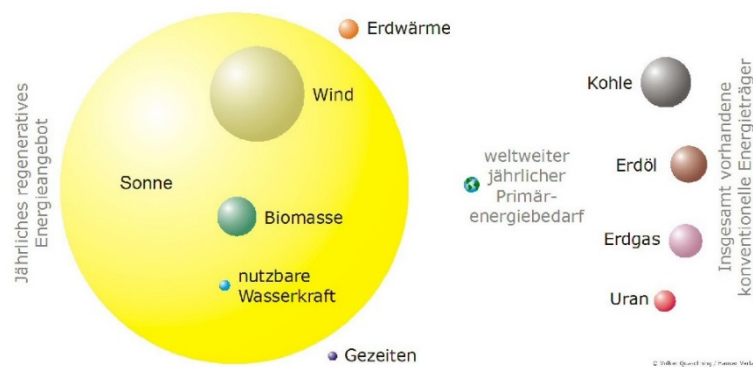


Abbildung 1.1: Vergleich von Angebot (regenerativ & konventionell) und Verbrauch an Primärenergie [QUA 11]

Wie Abbildung 1.1 zeigt, bietet die Strahlung der Sonne das größte Energieangebot, welches durch Technologien wie Photovoltaik und Solarthermie genutzt werden kann. Es werden bereits diverse Ansätze verfolgt um solche Technologien möglichst schnell auf breiter Basis zu etablieren. In Deutschland ist die Subventionierung der Photovoltaik über das Erneuerbare-Energien-Gesetz ein sehr gutes Beispiel. Globaler betrachtet gibt es beispielsweise die Desertec Industrial Initiative (Dii), welche sich zum Ziel gesetzt hat, die in verschiedenen Regionen der Erde nutzbaren erneuerbaren Energien ökologisch, wie auch



Abbildung 1.2: Benötigte Fläche in der Sahara zur Versorgung der beschriebenen Regionen [BOE 14]

ökonomisch am sinnvollsten einzusetzen. Die konzentrierende Solarthermie, oder englisch Concentrated Solar Power (CSP), spielt dabei durch ihr enormes Potential eine zentrale Rolle. Beispielsweise könnte durch deren Nutzung in weniger als 0,5 % der Wüsten der Welt, respektive in 2 % der Sahara wie in Abbildung 1.2 zu sehen, rechnerisch genug Strom erzeugt werden um den Bedarf der gesamten Welt zu decken [DES 14].

Ein entscheidender Vorteil der konzentrierenden Solarthermie gegenüber der Photovoltaik ist die Möglichkeit die über den Tag erzeugte Energie in Form von Wärme speichern und somit auch in der Nacht abrufen zu können, während das Speichern des photovoltaisch erzeugten Stroms nur begrenzt ökonomisch sinnvoll ist. Zu Beginn des Jahres waren weltweit solarthermische Kraftwerke mit einer Leistung von etwa 2,5 GW in Betrieb, während verschiedene Projekte mit weiteren 1,5 GW der Fertigstellung entgegen sahen. Im kommerziellen Kraftwerksbetrieb ist die Technologie der Parabolrinnen mit 95 % die am weitesten entwickelte und am umfangreichsten umgesetzte Variante eines Solarkraftwerks [BIN 13].

Entscheidend für die Auslegung und den Ertrag eines solchen Kraftwerks sind die optischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten, wie Spiegel und Receiver. Ein Minderertrag von 1 % würde bei einem Kraftwerk mit der Leistung von 50 MW in Spanien beispielsweise zu jährlichen Ertragseinbußen im sechsstelligen Eurobereich führen [PIT 09]. Durch eben diese hohen Ansprüche und die fortgeschrittene Technologie der Parabolrinnenkraftwerke, sind standardisierte Prüfverfahren und unabhängige Qualifizierung der spezifischen Kraftwerkskomponenten bedeutend. Mit diesen Aufgaben befasst sich seit dem Jahr 2008 unter anderem das unabhängige *Test and Qualification Center for Concentrating Solar Power Technologies*, kurz *QUARZ-Zentrum*, am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Im *QUARZ-Zentrum* des Instituts für Solarforschung, welches sich am DLR-Hauptsitz in Köln befindet, werden diverse Prüfstände entwickelt und betrieben, um einzelne Komponenten testen und bewerten zu können. So werden beispielsweise der Reflexionsgrad oder auch die Formgenauigkeit von Parabolspiegeln untersucht. Einen weiteren wesentlichen Teil nehmen die Arbeiten rund um die Parabolrinnenreceiver ein, welche auf thermische Verluste und den optischen Wirkungsgrad getestet werden. Außerdem werden Versuche zur beschleunigten Alterung durchgeführt und deren Auswirkungen auf wesentliche Eigenschaften der Parabolrinnenreceiver erforscht.

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Wie bereits erwähnt, sorgen die hohen Ansprüche an die einzelnen Kraftwerkskomponenten für eine steigende Bedeutung von standardisierten Prüfverfahren. Aus diesem Grund wird im *QUARZ-Zentrum* bereits der Prüfstand *ElliRec* betrieben, um die optischen Eigenschaften von Receivern bewerten zu können.

Die gestiegenen Ansprüche an die Messgenauigkeit und der mit Erfahrungen aus dem Messbetrieb festgestellte Verbesserungsbedarf führten zur Entwicklung des Nachfolgeprüfstands *OptiRec*, welcher nun bereits in einer zweiten Version realisiert werden konnte.

In der vorliegenden Arbeit soll der Wasserkreislauf als entscheidende Komponente des Prüfstands überarbeitet und die Funktionalität deutlich erweitert werden. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Erhöhung der Temperaturkonstanz des Wassers am Receivereintritt. Das bisher durch den zu prüfenden Receiver geführte Leitungswasser unterliegt unkontrollierbaren Schwankungen und führt somit zu einer Vielzahl an ungültigen Messungen. Hinter dem Receiver wird das Leitungswasser in den Ausguss geleitet, wodurch bei jeder Messung ein enormer Wasserverbrauch entsteht, den es zu verhindern gilt. Aus diesem Grund wird ein geschlossener Wasserkreislauf entwickelt, der über eine Rückkühlung auf die gewünschte Eintrittstemperatur verfügt. Zusätzlich soll auch die Einstellbarkeit und Konstanz des Massenstroms verbessert werden. Die bisherige Lösung per Kugelhahn erweist sich oftmals als schwierig in der Handhabung und unzureichend konstant über den Messzeitraum.

Als wichtige Komponente des Wasserkreislaufs wird außerdem die Receiverhalterung weiterentwickelt, sodass die Bedienung durch Reduzierung und Vereinfachung von Arbeitsschritten erleichtert wird. Möglicher Fehlbedienung beim Einbau von Receivern wird dadurch vorgebeugt und die Zeit zur Vorbereitung von Messungen verkürzt. Außerdem werden in Bezug auf die erste Generation des *OptiRec* die Flexibilität der Halterung und die Genauigkeit der Temperaturmessung zur Leistungsbestimmung erhöht, während die Kosten gesenkt werden können.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Auf den folgenden Seiten werden zunächst Grundlagen, wie die zur Berechnung einzelner Parameter verwendeten Gleichungen, beschrieben und auf die physikalischen und technischen Hintergründe zum grundlegenden Verständnis dieser Arbeit eingegangen. Anschließend werden dann Aufbau und Messprinzip der Prüfstände *ElliRec* und *OptiRec* beschrieben, woraus die Anforderungen an den in dieser Arbeit auszulegenden Wasserkreislauf abgeleitet werden.

Im ersten Hauptteil wird die Überarbeitung der Receiverhalterung thematisiert und ein Vergleich zu den vorherigen Versionen gezogen, um so die realisierten Verbesserungen darzustellen. Der zweite Hauptteil beschäftigt sich mit der Auslegung und der Umsetzung des geschlossenen Wasserkreislaufs. Nachdem zu Beginn die Entwicklung des Konzepts beschrieben wird, geht es darum die einzelnen Systemkomponenten auszulegen. Danach folgen der Aufbau und die erste Inbetriebnahme, sowie dabei aufgetretene Probleme und deren Lösung.

Zum Ende der Arbeit folgen noch Anpassungen der Überwachungssoftware, bevor abschließend Messergebnisse und gewonnene Erkenntnisse zusammenfassend dargelegt, ein Fazit in Bezug auf die Zielsetzung der Arbeit gezogen und eine Aussicht zum Prüfstand und den als nächstes anstehenden Arbeiten gegeben werden.



## 2 Grundlagen

Auf den folgenden Seiten werden die zur Berechnung einzelner Parameter benötigten Gleichungen und Grundlagen aus verschiedenen Bereichen zusammengestellt und erläutert. Außerdem werden zum besseren Verständnis der vorliegenden Arbeit die physikalischen und technischen Hintergründe zur Energiegewinnung aus konzentrierter Solarstrahlung, sowie der Aufbau und das Messprinzip der vorangegangenen Prüfstände beschrieben.

### 2.1 Physikalische Grundlagen

#### Strömungslehre

Zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $c$  in einer Rohr- oder Schlauchleitung können, in Abhängigkeit von bekannten Größen, die Definitionen des Volumenstroms, bzw. des Massenstroms

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho = c * A * \rho \quad (2.1)$$

mit	$\rho$	Dichte des Fluids
	$A$	durchströmter Querschnitt, senkrecht zur Strömung

verwendet werden. Stellt man diese entsprechend um, so erhält man

$$c = \frac{\dot{m}}{A * \rho} = \frac{\dot{V}}{A} \quad (2.2)$$

Als Druckverlust  $\Delta p_v$  wird die durch Wandreibung und Dissipation in Rohr- und Schlauchleitungen, sowie Formstücken, Armaturen usw. entstehende Druckdifferenz in einem Abschnitt oder einem gesamten hydraulischen System bezeichnet. Mit steigendem Durchfluss, bzw. steigender Strömungsgeschwindigkeit steigt auch der Druckverlust. Dies spiegelt sich gegenläufig in der Kennlinie einer Kreiselpumpe wieder. So wird der höchste Druck bei der Fördermenge Null erzeugt, wenn die Pumpe beispielsweise gegen eine geschlossene Armatur fördert. Kombiniert man beide Kennlinien, so bildet der Schnittpunkt aus Pumpen- und Anlagenkennlinie den Arbeitspunkt des hydraulischen Systems.

#### Thermodynamik

Die von einem Receiver absorbierte Nutzwärmeleistung lässt sich laut DIN EN 12975-2 wie folgt berechnen:

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (2.3)$$

mit	$\dot{m}$	Massenstrom
	$c_p$	spezifische Wärmekapazität des Fluids
	$\Delta T$	Differenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur

Unter Verwendung von Gleichung (2.1) lässt sich die Leistung auch wie folgt

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{V} * \rho * c_p * \Delta T \quad (2.4)$$

über den Volumenstrom ausdrücken. Im Zuge einer näheren Untersuchung zur erhöhten Messgenauigkeit [HAP 12] ergab sich unter Einbezug der ersten beiden Hauptsätze der Thermodynamik folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{m} * \Delta h \quad (2.5)$$

mit  $\Delta h$  Differenz der spezifischen Enthalpie zwischen Ein- und Austritt

Aus der Massenbilanz ergibt sich für eine aufgeteilte Masse, bzw. einen aufgeteilten Massenstrom [VDI 02]:

$$m_1 + m_2 = m_3 = m_{ges} \rightarrow \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{ges}$$

Unter Berücksichtigung des Energieerhaltungssatzes der Enthalpie, lässt sich aus den Massenströmen und der jeweiligen spezifischen Enthalpie eine Energiebilanz bilden [VDI 02]:

$$\dot{m}_1 * h_1 + \dot{m}_2 * h_2 = \dot{m}_3 * h_3 = \dot{m}_{ges} * h_{ges}$$

Die spezifische Enthalpie lässt sich wie folgt berechnen [VDI 02]:

$$h = p * c_p * \vartheta$$

mit  $p$  Druck des Fluids  
 $\vartheta$  Temperatur des Fluids

Durch die Vereinfachung, dass Druck und Temperatur als konstant angenommen werden, ergibt sich für die Energiebilanz:

$$\dot{m}_1 * \vartheta_1 + \dot{m}_2 * \vartheta_2 = \dot{m}_3 * \vartheta_3 = \dot{m}_{ges} * \vartheta_{ges}$$

Durch Umstellen der Gleichung ist die Berechnung einzelner Temperaturen ermöglicht:

$$\vartheta_3 = \vartheta_{ges} = \frac{\dot{m}_1 * \vartheta_1 + \dot{m}_2 * \vartheta_2}{\dot{m}_3} = \frac{\dot{m}_1 * \vartheta_1 + \dot{m}_2 * \vartheta_2}{\dot{m}_{ges}} \quad (2.6)$$

## Mechanik

Zur Auslegung des erforderlichen Spannungsquerschnitts  $A_s$  von nicht vorgespannten Schrauben [ROL 09] kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$A_s = \frac{F}{\sigma_{z(d)zul}} \quad (2.7)$$

mit  $F$  Zug- (oder Druck-)kraft für die Schraube  
 $\sigma_{z(d)zul}$  zulässige Zug- (oder Druck-)spannung

## Mathematik

Der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}_{arithm}$  einer Stichprobe berechnet sich aus

$$\bar{x}_{arithm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.8)$$

mit  $x_n$  Zahlenwerte  
 $n$  Anzahl der Zahlenwerte

Die Standardabweichung  $\sigma$  von diesem Mittelwert ergibt sich aus

$$\sigma = \sqrt{Var(x)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{arithm})^2} \quad (2.9)$$

## 2.2 Prüfstandskomponenten

In diesem Abschnitt soll auf grundlegende Aspekte der in dieser Arbeit verwendeten Prüfstandskomponenten eingegangen werden. Detailliertere Angaben zu wichtigen Parametern oder Funktionsweisen werden an entsprechender Stelle gemacht, oder sind den im Anhang hinterlegten Datenblättern zu entnehmen.

### Datenlogger

Bei einem Datenlogger handelt es sich um eine prozessgesteuerte Speichereinheit. Daten werden in einem bestimmten Rhythmus über eine Schnittstelle aufgenommen und auf einem Speichermedium gesichert oder an eine Computersoftware weitergegeben. Zumeist besteht ein Datenlogger aus einer Kombination von Hardware und Sensoren und dient somit dazu physikalische Messdaten wie beispielsweise Temperaturen, Drücke oder Spannungen über eine bestimmte Zeit aufzunehmen.

An den Prüfständen *ElliRec* und *OptiRec* werden Datenlogger der Firma *Ahlborn* aus dem sogenannten *ALMEMO*-System betrieben. Dieses System zeichnet sich dadurch aus, dass sich geberspezifische Parameter und Kalibrationen nicht etwa im Gerät oder auf der Messkarte, sondern in intelligenten, programmierbaren Eingangssteckern befinden. Dies ermöglicht das Auslesen verschiedenster Sensoren mit nur einem Messgerät. Die verwendete Messwerterfassungsanlage *ALMEMO 5690-2M09* mit Grafikdisplay stellt ein modular erweiterbares Basis-System dar und verfügt zusätzlich zur verbauten Mastermesskreiskarte *MM-A9* über sechs weitere Steckplätze, die unterschiedlichste Erweiterungen ermöglichen. Da die neun vorhandenen Eingänge nicht für die Vielzahl an Sensoren ausreichen, wurde das System mit zwei weiteren Messstellenumschaltkarten *U-A10* ausgerüstet, welche jeweils über zehn galvanisch getrennte Eingänge verfügen. Somit verfügt der Datenlogger über 39 Eingänge, welche mittels diverser Eingangsstecker [HAP 12] in der Lage sind Signale von einer Vielzahl von Sensoren zu verarbeiten. Der Datenlogger kann über eine USB-Schnittstelle von einem Computer angesteuert und ausgelesen werden.

### **Strömungserhitzer**

Ein Strömungserhitzer besteht aus einem elektrischen Heizkörper, der wiederum in ein Strömungsrohr aus Edelstahl eingelassen ist. Durch zwei Anschlüsse wird ein Medium in das Strömungsrohr ein- und wieder ausgeleitet. Mittels einer elektrisch eingespeisten Leistung lässt sich das durchströmende Medium erwärmen. Die einzelnen Heizkreise werden von einem stromführenden NiCr-Draht gebildet, welcher mit einem besonders dichten Magnesiumoxidpulver beschichtet ist, sodass eine gute Wärmeleitfähigkeit vorherrscht. Da Strömungserhitzer, ähnlich wie Tauchsieder, die angeschlossene elektrische Leistung unter sehr geringen Verlusten in Wärme umsetzen, besitzen Sie mit etwa 98 % einen sehr hohen Wirkungsgrad und ermöglichen somit eine optimale Leistungsübertragung auf das Medium.

### **Leistungssteller**

Ein Leistungssteller dient dazu die Aufnahme von Leistung, bzw. Strom oder Spannung, eines elektronischen Geräts variabel von 0-100 % stellen zu können. Das wird durch die Verringerung des Effektivwertes der Netzwechselspannung ermöglicht. Dazu wird im Rahmen einer Phasenanschnittsteuerung jede einzelne Halbwelle der Netzspannung angeschnitten, sodass der Verbraucher nicht während der gesamten Sinusschwingung eingeschaltet ist und somit in seiner Strom-, bzw. Leistungsaufnahme eingeschränkt wird. Die Steuerung der durch den Strömungserhitzer abgegebenen Leistung findet mittels eines Leistungsstellers statt. Dieser wird wiederum mit einem Signal von 0...10 V analog angesteuert.

### **Kaltwassersatz**

Kaltwassersätze werden genutzt um ein Fluid zu kühlen. Dieses Fluid wird wiederum als Wärmeträgermedium eingesetzt um an einer Wärmequelle Energie in Form von Wärme aufzunehmen und abzutransportieren. Als Fluid wird hier auf Wasser zurückgegriffen, welches in einem eigenen Kreislauf zirkuliert. Wesentliche Bestandteile des Kaltwassersatzes sind ein Tank mit Pumpe, sowie ein Kältekreislauf der nach dem Prinzip eines linkslaufenden Carnot-Kreisprozesses arbeitet und dem Wärmeträgermedium Wasser die aufgenommene Wärme entzieht. Dies geschieht im Wärmeübertrager, welcher den Wasserkreislauf hydraulisch vom Kältekreislauf trennt und dem Kältemittel als Verdampfer dient. Der Kaltwassersatz beinhaltet ansonsten noch einen Kompressor, einen Verflüssiger und ein Drosselventil um den Kältekreislauf schließen zu können. Die vom Kältekreislauf aufgenommene Wärme wird beim Phasenwechsel des Kältemittels von gasförmig zu flüssig, über einen Axialventilator vom Verflüssiger an die Umgebung abgegeben. Somit können Kaltwassersätze von der Wärmequelle getrennt aufgestellt und über Rohr- oder Schlauchleitungen angeschlossen werden, sodass bei der Montage nicht in den Kältekreislauf eingegriffen werden muss.

## 2.3 Konzentrierende Solarthermie

Energiegewinnung durch konzentrierte Solarstrahlung wird zum größten Teil in kommerziellen Kraftwerken realisiert und ist, anders als die gewöhnliche Solarthermie oder die Photovoltaik, nur sehr selten im privaten Sektor vorzufinden. Eine spezielle Form der konzentrierenden Solarthermie sind die Parabolrinnenkollektoren. Da der thematisierte Prüfstand zur Beurteilung von Parabolrinnenreceivern dient, folgen hier lediglich Informationen zur entsprechenden Technologie, während andere Arten der Konzentration keine Erwähnung finden können.

In solarthermischen Anwendungen wird einfallende Solarstrahlung dazu genutzt ein Medium zu erhitzen und somit Energie in Form von Wärme bereitzustellen. Das Spektrum der Solarstrahlung entspricht in etwa der Abstrahlung eines schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 5777 K. Daraus lässt sich eine mittlere extraterrestrische Bestrahlungsstärke von 1367 W/m<sup>2</sup> ermitteln, welche als Solarkonstante festgelegt ist. Beim Durchdringen der Atmosphäre wird die Intensität der Strahlung aufgrund von Effekten wie Streuung, Reflexion und Absorption stark reduziert. Als solarer Ertrag bleiben beispielsweise für den Raum Köln lediglich 1000 kWh/m<sup>2</sup>a, während man für Länder in Südeuropa mit Erträgen über 1700 kWh/m<sup>2</sup>a rechnen kann. Für Regionen nahe dem Äquator kann eine Einstrahlung von bis zu 2250 kWh/m<sup>2</sup>a angenommen werden.

Um Kraftwerksprozesse effektiv und ökonomisch sinnvoll betreiben zu können, werden Temperaturen jenseits von 200 °C benötigt. Um diese Temperaturen realisieren zu können, ist es nötig die Strahlung vor dem Erhitzen des Mediums zu konzentrieren. Betrachtet man die Gleichung für den Carnot-Wirkungsgrad, so wird ein weiterer Vorteil der Konzentration deutlich:

$$\eta_C = \frac{T_h - T_n}{T_h} = 1 - \frac{T_n}{T_h} \quad (2.10)$$

mit:  $T_h$       höchste Temperatur des Prozesses  
 $T_n$       niedrigste Temperatur des Prozesses

Eine Erhöhung der oberen Prozesstemperatur verursacht eine Differenzserhöhung zur unteren Prozesstemperatur, was folglich zu einer Steigerung des Carnot-Wirkungsgrads für den auf die Konzentration folgenden Prozess bedeutet.

Für die Konzentration kann jedoch nur quasiparallel einfallendes Licht genutzt werden, sprich der Anteil der Globalstrahlung, der als Direktstrahlung vorliegt. Die Diffusstrahlung findet hier, im Gegensatz zur Photovoltaik, keine Verwendung. Trifft die Strahlung, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, parallel zur optischen Achse  $y$  auf die Geometrie, so werden im Fall einer Parabel alle Strahlen durch einmalige Reflexion in einem Brennpunkt, oder dreidimensional gesehen in einer Brenn- oder Fokallinie, gebündelt. Die hier mit  $f$  bezeichnete Brennweite ist der Abstand vom Scheitelpunkt der Parabel bis zum Fokus, beziehungsweise bis zur Fokallinie [QUA 11].

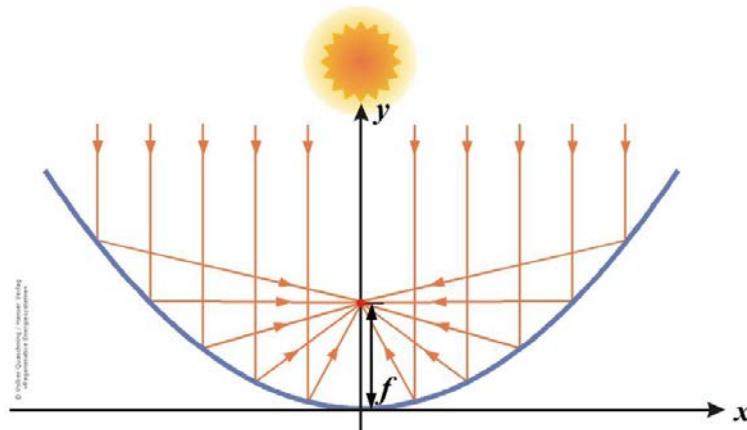


Abbildung 2.1: Strahlengang an einer Parabel [QUA 11]

Der theoretisch maximal mögliche Grad der Konzentration ergibt sich aus einem Verhältnis von Konzentratorfläche zu Absorberfläche und wird bei zweiachsiger Nachführung mit dem Konzentrationsfaktor  $c_{max} = 46211$  angegeben. Für in einer Achse nachgeführte Systeme, wie die betrachteten Parabolrinnen, ist nach

$$c_{max, einachsige} = \sqrt{c_{max}} \quad (2.11)$$

ein theoretischer Höchstwert von  $c_{max, einachsige} = 215$  erreichbar. In der Praxis liegt der Faktor für die maximale Konzentration zwischen Werten von 80 und 100, was in der optischen Qualität der Spiegel, wie Formfehler oder einfache Verschmutzung, aber auch in Ungenauigkeiten bei der Nachführung des Kollektors begründet sein kann [DIB 13].

## 2.4 Linienfokussierendes System Parabolrinnenkraftwerk

Forschung seit mehr als 100 Jahren, das erste Parabolrinnenkraftwerk zur kommerziellen Stromerzeugung in der kalifornischen Mojave-Wüste im Jahr 1984 und die heutigen Anlagen mit einer installierten Gesamtleistung von mehr als 2 GW bilden eine breite Basis an Betriebserfahrung für die Parabolrinnentechnologie. Ein Parabolrinnenkraftwerk nach dem Schema von Abbildung 2.2 besteht aus zwei Blöcken. Auf der linken Seite ist das

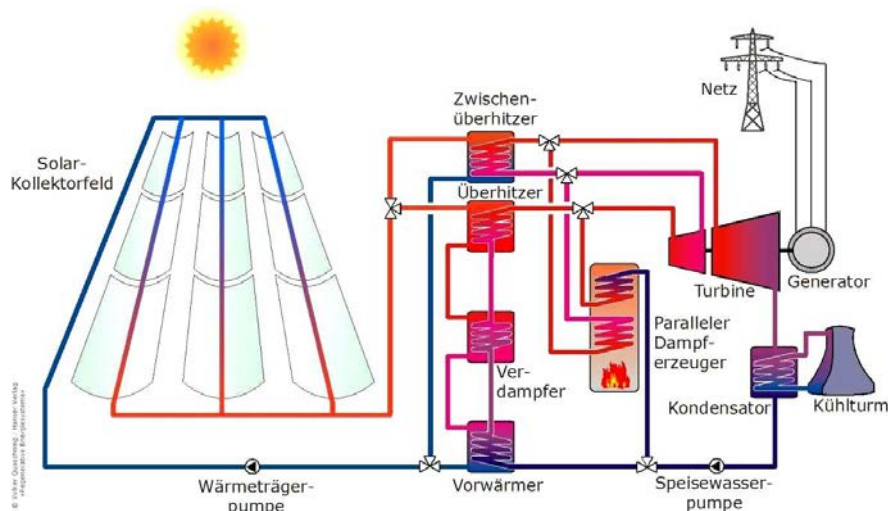


Abbildung 2.2: Prinzipskizze eines Parabolrinnenkraftwerks [QUA 11]

Solar-Kollektorfeld zu sehen, welches dazu dient die Solarstrahlung zu konzentrieren, sowie die enthaltene Energie in Form von Wärme aufzunehmen. Die rechte Seite zeigt den Kraftwerksblock, oder auch Powerblock, in welchem die aufgenommene Wärme zur Stromerzeugung verwendet wird.

Das Solarkollektorfeld nimmt in Abhängigkeit von der angestrebten Kraftwerksleistung eine Fläche von mehreren Quadratkilometern ein und besteht aus den drei Hauptkomponenten Tragekonstruktion, Parabolspiegel und Absorberrohr, welche in der folgenden Abbildung 2.3 zu sehen sind. Die einfallende Solarstrahlung wird von den Spiegeln reflektiert und auf das in der Fokallinie positionierte Absorberrohr konzentriert. Die dabei am Absorberrohr entstehende Wärme überträgt sich auf das im Inneren des Rohres fließende Wärmeträgermedium. Als sogenannte temperaturstabile Wärmeträgermedien sind Thermoöle bisher am weitesten verbreitet. Diese zersetzen sich jedoch bei Temperaturen oberhalb von 400 °C. Höhere Prozesstemperaturen können Salzschnmelzen mit einer Grenztemperatur von 550 °C und Wasser zur Direktverdampfung bei ebenfalls 550 °C und einem Druck von mehr als 230 bar liefern [DIB 13].

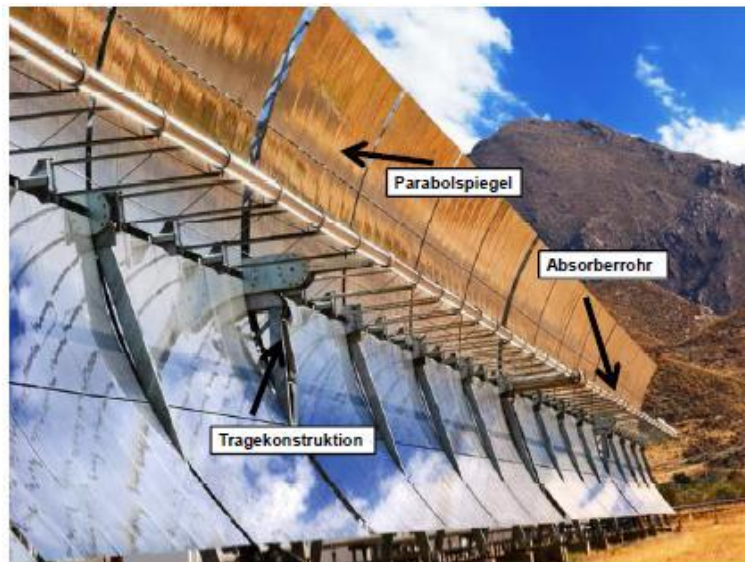


Abbildung 2.3: Parabolrinnenkollektor auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) in Spanien [WEI 11]

Die Umwandlung der im Kollektorfeld aufgenommenen thermischen Energie in elektrischen Strom erfolgt im Normalfall als Dampfprozess im Kraftwerksblock. Hierbei handelt es sich, wie in Abbildung 2.4 abgebildet, um den realen thermodynamischen Kreisprozess nach Clausius-Rankine, welcher die Grundlage für die Stromerzeugung in Dampfkraftwerken bildet. Da der Wasserkreislauf für den Dampfprozess vom Kollektorkreislauf getrennt ist, wird die Wärme aus dem Wärmeträgermedium mittels Wärmeübertrager an den Wasserkreislauf abgegeben. Die eingekoppelte Wärme wird genutzt um das Wasser unter Druck isobar vorzuwärmen (a - b), dann zu verdampfen (b - c) und den entstandenen Wasserdampf dann zur Volumensteigerung zu überhitzen (c - d). Der überhitzte Wasserdampf wird in einer konventionellen Dampfturbine entspannt (d - e), wodurch thermische Energie in mechanische Arbeit umgewandelt wird. Die mechanische Arbeit treibt einen an die Turbine angekoppelten Generator an und erzeugt somit elektrischen Strom.

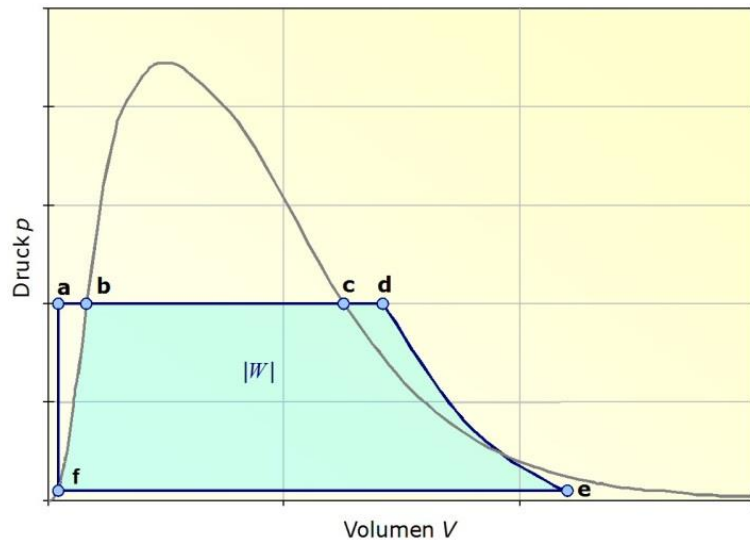


Abbildung 2.4:  $p$ - $V$ -Diagramm eines Clausius-Rankine-Prozesses [QUA 11]

Der Kreisprozess wird geschlossen, indem der Dampf durch Kondensator und Kühlturm vollständig zu Wasser auskondensiert (e - f) und mittels einer Speisewasserpumpe wieder auf den Ausgangsdruck gebracht wird (f - a).

## 2.5 Parabolrinnenreceiver

Eine Schlüsselkomponente in den Solarkollektoren eines Parabolrinnenkraftwerks sind die in der Fokallinie positionierten Parabolrinnenreceiver. Abbildung 2.5 zeigt die einzelnen Bestandteile eines solchen Receivers. Diese dienen dazu die konzentrierte Solarstrahlung aufzunehmen und in Form von Wärme an das Wärmeträgermedium in ihrem Inneren abzugeben. Diese Aufgabe wird hauptsächlich durch das, hier blau dargestellte und meist aus

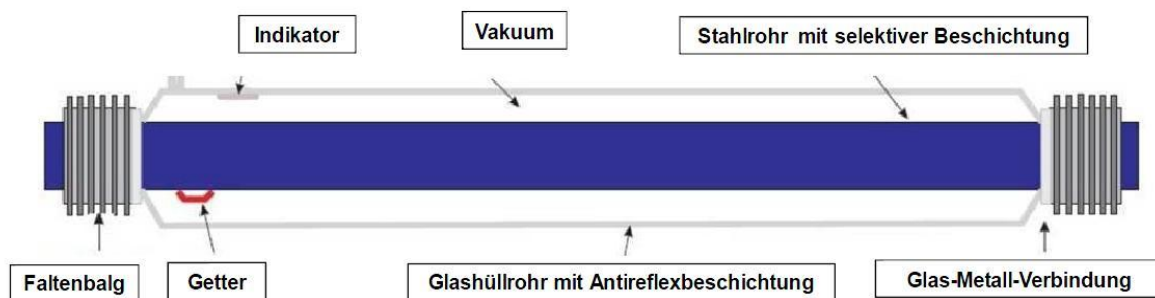


Abbildung 2.5: Aufbau eines Parabolrinnenreceivers [MIN 10]

Edelstahl gefertigte, Absorberrohre realisiert. In einem Kollektor werden einzelne Absorberrohre aneinander geschweißt, um eine große Kollektorlänge und somit den gewünschten Temperaturhub zu erreichen. Das Absorberrohr ist mit einer dreilagigen, selektiven Beschichtung versehen. Diese sorgt für eine geringe Reflexion und hohe Absorption der Solarstrahlung, aber minimiert die thermischen Verluste durch Emission von Infrarotstrahlung und die Diffusion von Wasserstoff aus dem Wärmeträgermedium durch das Absorberrohr. Bei einer Betriebstemperatur von 400 °C lassen sich Absorptionsgrade von bis zu 95,5 % und Emissionsgrade unter 9,5 % realisieren [BEN 11].



Umgeben wird das Absorberrohr von einem evakuierten Glashüllrohr aus robustem und hochtransparentem Borosilikatglas. Dank einer Antireflexbeschichtung liegt der Transmissionsgrad oberhalb von 96,5 % [SCH 09]. Das Vakuum unterdrückt thermische Verluste durch Konvektion und Gaswärmeleitung. Für den Fall, dass trotz der Beschichtung Wasserstoff in den evakuierten Bereich diffundiert, sind dort Getter angebracht, die den Wasserstoff binden, das Vakuum aufrechterhalten und somit eine Erhöhung des Wärmeübergangs und folglich der thermischen Verluste verhindern. Zur Kontrolle des Vakuums ist am Glashüllrohr ein Silberindikator angebracht, welcher beim Kontakt mit Sauerstoff oxidiert und somit durch Verfärbung den Verlust des Vakuums signalisiert.

In der folgenden Abbildung 2.6 werden die am Receiver auftretenden Verluste dargestellt. Die eintreffende Solarstrahlung wird durch unvollständige Reflektion (begründet im Reflektionsgrad  $\rho$ ) und geometrisch bedingte Verluste an Reflektor und Receiver (symbolisiert durch den Intercept-Faktor  $\gamma$ ) reduziert, bevor sie den Receiver erreicht. Am Receiver

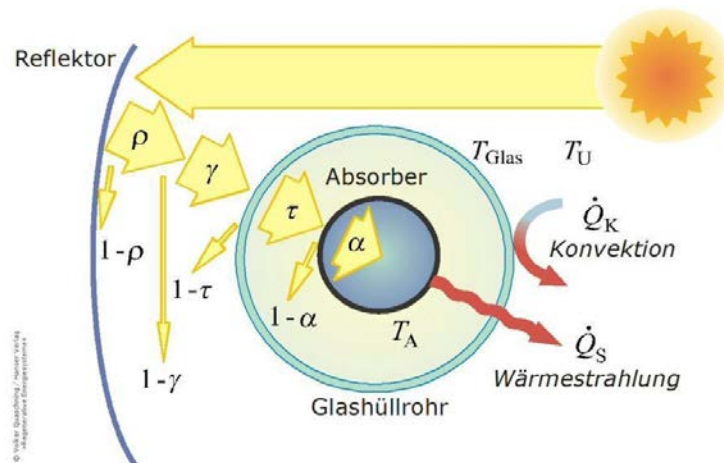


Abbildung 2.6: Optische und Thermische Verluste am Parabolrinnen-Kollektor [QUA 11]

verringern der Transmissionsgrad  $\tau$  des Glashüllrohrs und der Absorptionsgrad  $\alpha$  des Absorberrohrs die Menge der Solarstrahlung, die vom Wärmeträgermedium aufgenommen wird. Zusätzlich zu diesen optischen Verlusten können thermische Verluste durch Wärmestrahlung des Absorbers  $\dot{Q}_s$  oder Konvektion am Glashüllrohr  $\dot{Q}_K$  auftreten. Da sich der optische und der thermische Wirkungsgrad gegenseitig beeinflussen, muss für einen optimalen Gesamtwirkungsgrad ein Kompromiss aus beiden gefunden werden, der zu den Anforderungen am Kraftwerksstandort am besten passt.

Bei der Glas-Metall-Verbindung an beiden Enden des Glashüllrohrs handelt es sich um eine thermisch, wie auch mechanisch sensible Stelle. Um diese zu schützen werden zum einen Strahlungsschutzbleche während des Betriebs angebracht, zum anderen muss eine Differenz der Temperatur, wie auch der thermischen Längenausdehnung von Absorber- und Glashüllrohr kompensiert werden. Bei einer Absorbtemperatur von 400 °C liegt die Glashüllrohrtemperatur bei etwa 70 °C. Um Verformungen oder Spannungsrisse zu verhindern und verschiedenen starke Längenänderungen aufgrund von unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten auszugleichen, sind Glas und Metall über sogenannte Faltenbalge miteinander verbunden. Ein Unterschied dieser Faltenbalge ist, dass je nach Konstruktionsansatz die bestrahlte Absorberfläche bei steigender Temperatur entweder gleich bleibt, oder sich noch vergrößert.

Aufgrund der meisten Betriebserfahrung werden als Wärmeträgermedium überwiegend Thermoöle eingesetzt. Die Abmessungen für entsprechende Parabolrinnenreceiver sind weitestgehend standardisiert. In Tabelle 2.1 sind die Maße eines solchen Receivers zum Betrieb in Eurotrough-Kollektoren aufgeführt.

*Tabelle 2.1: Abmessungen eines Thermoöl-Receivers für den Einsatz im Eurotrough-Kollektor in mm [SCH 09]*

Länge Absorberrohr	4060
Durchmesser Absorberrohr	70
Wandstärke Absorberrohr	2...4
Durchmesser Glashüllrohr	125
Durchmesser Strahlenschutz	160

Für den Betrieb mit anderen Wärmeträgermedien müssen die Receiver aufgrund geänderter Prozessparameter angepasst werden. So werden Absorberrohre für die Direktverdampfung von Wasser, wegen der erhöhten Druckbelastung, mit dickeren Wandstärken gefertigt. Des Weiteren werden mit zunehmender Kollektorgröße auch die Abmessungen der Receiver zunehmen. Bereits jetzt werden Absorber mit einem Durchmesser von 88,9 mm eingesetzt. [WEI 11] Im Hinblick auf langfristige Einsetzbarkeit ist es für die Entwicklung eines Prüfstands wichtig, auch mit Receivern von größerer Länge und größerem Durchmesser Versuche durchführen zu können.

## 2.6 Stand der Technik

In diesem Abschnitt soll auf die im QUARZ betriebenen Sonnensimulatorprüfstände *ElliRec* und *OptiRec* eingegangen werden. Hierzu werden das Messprinzip, der grundlegende Aufbau, sowie der Entwicklungsverlauf der Schlüsselkomponente Receiverhalterung beschrieben.

### 2.6.1 Elliptischer Receiverprüfstand - ElliRec

Zur zerstörungsfreien, witterungsunabhängigen und somit reproduzierbaren Bewertung der optischen Eigenschaften von Parabolrinnenreceivern wurde am DLR im Jahr 2008 der Prüfstand *ElliRec* in der Diplomarbeit von Macke [MAC 08] entwickelt und realisiert, sowie in den Arbeiten von Litzke [LIT 10] und Ant [ANT 12] weiterentwickelt.

Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, wird die Grundform des Prüfstands aus hochspiegelnden Aluminiumblechen gebildet, die so angeordnet sind, dass sie eine räumlich ausgetragene Ellipse ergeben. Die offenen Enden werden von flachen Blechen verschlossen. Das Messprinzip besteht daraus, dass zunächst dem Sonnenspektrum ähnliche Strahlung von Halogenmetalllampen in der einen Fokallinie emittiert und nach einmaliger Spiegelung

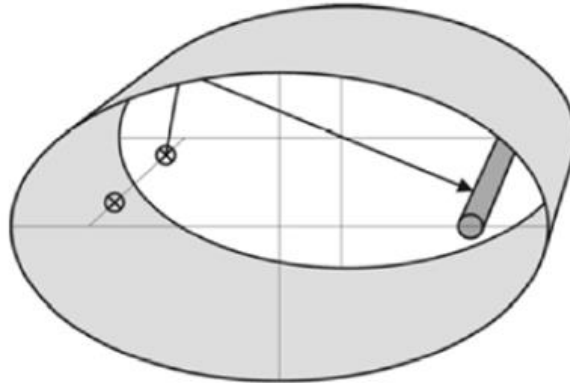


Abbildung 2.7: Strahlengang im ElliRec von HMI-Lampen (links) zu Receiver (rechts) [WEI 11]

durch die Aluminiumbleche auf einen Receiver in der anderen Fokallinie konzentriert wird. Die Strahlung wird am Receiver in thermische Energie umgewandelt und überträgt sich auf den Absorber durchströmendes Wasser. Über die Messung von Durchfluss, Ein- und Austrittstemperatur des Wassers, sowie dessen Stoffdaten, lässt sich mit der Gleichung (2.3) die absorbierte Leistung berechnen.

Zur Bewertung der Receiver wird der ermittelte Wert für die absorbierte Leistung auf eine Referenzmessung vom Beginn des Messtages bezogen. Aufgrund von tagesabhängigen Schwankungen, wie Verschmutzung oder Verformung der Spiegel, sowie Langzeiteinflüssen, wie Alterung der Spiegel und Lampen, können weder der direkte Vergleich von Messwerten, noch der absolute Wirkungsgrad eines Receivers als hinreichend genau betrachtet werden. Die ausreichend exakte Ermittlung eines optischen Wirkungsgrades scheitert zusätzlich an fehlenden Parametern wie der emittierten Strahlung der Lampen, oder dem Intercept-Faktor des Prüfstands. Über die Methode der relativ zu einer Referenz durchgeführten Messung können jedoch verlässliche und genaue Ergebnisse, sowie eine zufriedenstellende Reproduzierbarkeit erreicht werden.

Der grundlegende Messaufbau mit den vier äquidistant angebrachten Lampen, welche jeweils über eine elektrische Anschlussleistung von 4 kW verfügen, sowie dem gegenüberliegenden Receiver ist in Abbildung 2.8 schematisch dargestellt. Um ein Leerlaufen zu verhindern verfügt der Tank über einen Schwimmschalter, während ein Schwimmventil für einen konstanten Füllstand an Leitungswasser sorgt und so Druckschwankungen auf der Saugseite der Pumpe minimiert. Der benötigte Volumenstrom wird von einer Kreiselpumpe bereitgestellt, über eine manuelle Drossel auf den Sollwert eingestellt und von einem magnetisch-induktiven Volumenstromsensor gemessen. Die Temperatur des Wassers wird in Messstellen vor und hinter dem Receiver gemessen, bevor das Wasser in den Abfluss strömt. Diese Messstellen liegen nicht direkt am Receiver, sondern circa 1000 mm davon entfernt und beinhalten jeweils drei hochgenaue Pt100-Sensoren, deren Mittelwert die jeweilige Temperatur  $T_{in}$ , bzw.  $T_{out}$

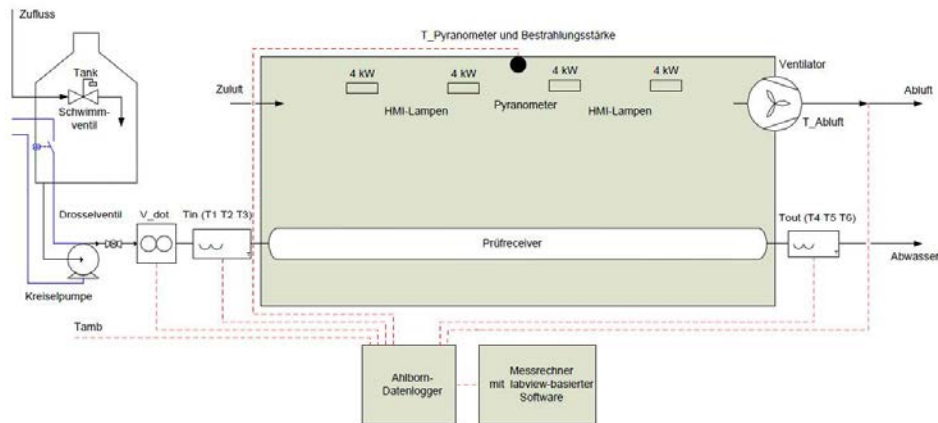


Abbildung 2.8: Verfahrensschema des ElliRec [ANT 12]

ergibt. Die Auflösung der Temperaturmessung fällt mit dem zu messenden Temperaturhub. Da die Wassertemperatur auf Umgebungsniveau liegt, werden thermische Verluste bei dieser Messung vernachlässigt. Die einzelnen Systemkomponenten sind über Schlauchleitungen verbunden, wodurch eine hohe Flexibilität und einfache Handhabung ermöglicht wird. Um eine Durchbiegung des Receivers aufgrund von Temperaturschichtungen zu verhindern, wurde ein Störkörper entwickelt [ANT 12]. In den Receiver eingeschoben verengt dieser den Strömungsquerschnitt des Absorberrohrs auf einen 5 mm breiten Ringspalt und zwingt das Wasser mittels einer Drahtseilwicklung in eine helixförmige Strömung, was eine höhere Fließgeschwindigkeit, eine bessere Durchmischung und eine Homogenisierung der Temperatur in Umfangsrichtung bewirkt. Zusätzlich wird auch das Entlüften des Receivers beim Befüllen mit Wasser unterstützt.

Zur Messung der Strahlungsleistung im Inneren des Prüfstands ist ein Pyranometer zwischen den Lampen angebracht, welches jedoch nur zur Erkennung von Fehlzündungen, Ausfällen oder sehr starken Schwankungen genutzt werden kann. Zur genaueren Beobachtung der Strahlungsleistung wurden hinter den Lampen Fotodioden angebracht. Der von den Dioden erzeugte Strom wird gemessen und zur Überwachung der Lampen genutzt. Ein Axialventilator führt die anfallende Abwärme aus dem Innenraum des *ElliRec* und hält diesen auf Umgebungstemperatur. Erfasst und gespeichert werden die Messwerte im Prüfstand von zwei Datenloggern, welche wiederum über einen Computer mit einem auf der Software *LabVIEW* basierenden Programm angesteuert und in Echtzeit überwacht werden.

Das am *ElliRec* vorhandene Optimierungspotential sind im Wesentlichen zwei Aspekte. Zum einen scheinen Reproduzierbarkeit und Messgenauigkeit weiter verbessert werden zu können. Die Langzeitstabilität verschlechtert sich aufgrund der Aluminiumbleche zunehmend, da diese über längere Zeit nicht formbeständig sind, was sich in einem Durchhängen äußert und auch durch Nachziehen nicht ausreichend behoben werden kann. Des Weiteren werden die Form, die Oberflächenbeschaffenheit und somit auch die Reflektivität der Spiegel durch das notwendige Reinigen zu Beginn eines Messtages immer weiter verschlechtert. Mit den verwendeten Pt100-Messfühlern findet die Temperaturmessung bereits im Bereich höchster Genauigkeit statt. Um thermischen Austausch mit der Umgebung und somit Störeinflüsse weiter reduzieren zu können, ist jedoch eine Verringerung der Distanz zwischen Messstellen und Receiver notwendig. Eine Verbesserung der Messgenauigkeit ist vor allem bei der Durchflussmessung möglich.

Als zweiter Aspekt soll der zeitliche und personelle Aufwand einer Messung reduziert werden. So dauert am *ElliRec* eine Messung mindestens 60 Minuten, wobei 30 Minuten bis zum Erreichen der vollen Leistung der HMI-Lampen verstreichen. Erst dann beginnt der eigentliche Messzeitraum von 10 Minuten. Für den Ein- und Ausbau des Receivers werden weitere 20 Minuten und zwei darin geübte Personen benötigt. Die Verbesserung der Bedien- und Begehrbarkeit des Prüfstands, sowie die Möglichkeit den Receiver bei eingeschalteten Lampen zu wechseln, führt zu einem geringeren zeitlichen Aufwand der Messungen, was mehrere Messungen eines Receivers im Rahmen der jeweiligen Messkampagne ermöglicht. Dies wiederum erhöht die Sicherheit der Messergebnisse aufgrund einer verbesserten Statistik.

### 2.6.2 Optischer Receiverprüfstand - OptiRec

In der Diplomarbeit von Weinhausen [WEI 11] wurde das Konzept des Prüfstands *OptiRec* entwickelt. Dieses wurde in den Arbeiten von Ant [ANT 12] und Happich [HAP 12] weiterentwickelt und in einer ersten Version realisiert. Das Messprinzip des *ElliRec* wurde grundlegend übernommen. Zur Bewertung der Parabolrinnenreceiver wird weiterhin Strahlung über eine Ellipsengeometrie konzentriert, die entsprechenden Parameter gemessen und die absorbierte Leistung berechnet. Die Berechnung erfolgt von nun an nach Gleichung (2.5), da diese eine exaktere Berechnung ermöglicht [HAP 12]. Die Weiterentwicklungen der im vorigen Abschnitt genannten Aspekte mit Optimierungspotential werden im Folgenden beschrieben.

Die Abmessungen der Ellipse wurden dahingehend überarbeitet, dass die Homogenität der Bestrahlung über die Länge des Receivers vergrößert und die Achsen der Ellipse verkleinert werden konnten. Um Receiver bis zu einer Länge von 5 m bewerten zu können, wurde die Spiegelrinne entsprechend verlängert. Die optische Qualität, sowie die zeitliche Formstabilität und Dauerhaltbarkeit der Ellipse wurden verbessert indem man die Aluminiumbleche durch Glasspiegel ersetzt. Die Ausrichtung der Ellipse wird, wie in Abbildung 2.9 zu sehen, geändert, sodass die Fokallinien nicht mehr nebeneinander, sondern untereinander liegen. An der



Abbildung 2.9: Anordnung der optischen Elemente im OptiRec [HAP 12]

unteren Seite endet die Ellipse oberhalb der Fokallinie, sodass der Receiver nur noch einseitig bestrahlt wird, aber beidseitig zugänglich ist. Diese Anordnung minimiert zusätzlich Staubablagerungen. Die Aufteilung in 16 Facetten ist fertigungsbedingt. Die äußeren Enden

der Spiegelrinne werden weiterhin von flachen Spiegeln geschlossen. Um zusätzlich die Homogenität der Strahlung zu verbessern, werden sechs Halogenmetalllampen mit einer elektrischen Leistung von je 2,5 kW in identischen Abständen in der oberen Fokallinie angebracht. Die Temperaturmessung erfolgt weiterhin mit Pt100-Sensoren. Auf die Receiverhalterung wird in Abschnitt 2.6.3 näher eingegangen. Die Durchflussmessung konnte in Bezug auf Genauigkeit und Reproduzierbarkeit um den Faktor 4 gesteigert werden, indem ein Coriolissensors zur Massenstrommessung eingesetzt wird. [HAP 12]

Der personelle und zeitliche Aufwand einer Messung am *ElliRec* konnte durch eine angepasste Konstruktion des *OptiRec* verringert werden. Im Inneren des Prüfstands ist in Bodennähe eine rechteckige Rahmenkonstruktion realisiert, welche an beiden Enden über Linearführungen gelagert ist und somit senkrecht zur Ellipse aus dem Prüfstand heraus gezogen werden kann. Auf diesem Rahmen wird der Receiver mithilfe der Receiverhalterung fixiert. Durch diesen Aufbau ist es möglich den Receiver aus dem Prüfstand herauszuziehen und gegen einen anderen auszutauschen, ohne dabei die Lampen ausschalten oder das Innere des Prüfstands betreten zu müssen. Dies verringert die Messzeit, da die Einbrennzeit der Lampen eingespart wird. Der Aufwand zum Austauschen eines Receivers wird verringert, da das Tragen des Receivers entfällt. Dies verringert auch die zum Receiverwechsel benötigte Zeit. Wartungs- oder Reinigungsarbeiten im Inneren des *OptiRec* können im Vergleich zum *ElliRec* wesentlich komfortabler durchgeführt werden, da seitliche Türen die Begehrbarkeit und die Prüfstandsform einen aufrechten Gang möglich machen.

Abbildung 2.10 zeigt den Versuchsaufbau des *OptiRec*. Die Wasserversorgung ist äquivalent zum *ElliRec*, indem Leitungswasser mittels einer Kreiselpumpe von einem Tank durch den Receiver und in den Abfluss gepumpt wird. Der Druckverlust im System konnte deutlich verringert werden, indem der Innendurchmesser der verwendeten Schlauchleitungen von ½ Zoll auf 1 Zoll verdoppelt wurde [HAP 12]. Die Messung des Durchflusses, der Eintrittstemperatur und des Drucks, welche nunmehr digital erfolgt, finden vor dem Eintritt des Wassers in den Receiver statt. Die der Austrittstemperatur entsprechend danach. Zusätzlich wurden zum Monitoring diverse Temperaturmessstellen realisiert, wie z. B. auf zwei Spiegelfacetten.

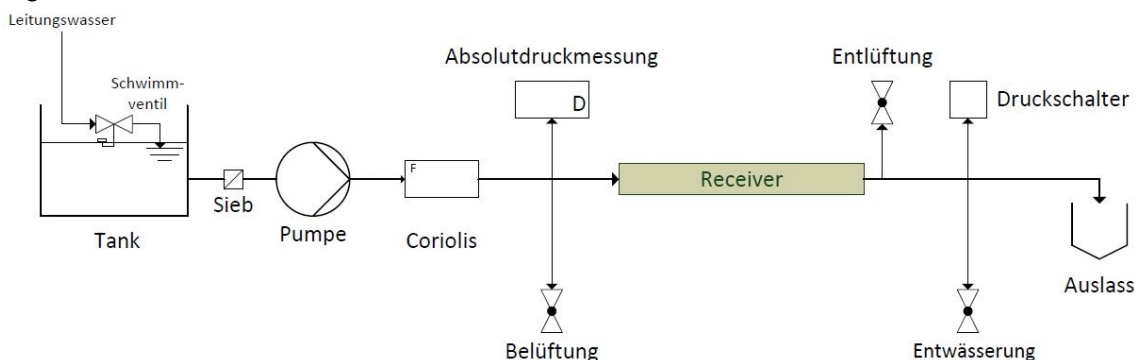


Abbildung 2.10: Verfahrensschema des *OptiRec*

Auf ein Pyranometer wurde in diesem Prüfstand verzichtet, jedoch wurde die Lampenüberwachung mittels Fotodioden um eine Temperaturmessstelle an jeder Fotodiode erweitert, sodass eine entsprechende Korrektur aufgrund von Temperatureinflüssen in der Messungsauswertung vorgenommen werden kann. Die Erfassung der Messwerte erfolgt hier mit einem einzelnen, jedoch funktionelleren Datenlogger, welcher die gesteigerte Anzahl an

Messstellen abdecken kann [HAP 12]. Ein computerbasiertes *LabVIEW*-Programm wird zum Auslesen und Überwachen verwendet.

Da die Tragstruktur und der messtechnische Aufbau mittlerweile sehr ausgereift sind, liegt das größte noch vorhandene Verbesserungspotential bei den Komponenten zur Wasserversorgung. Die Nutzung von Leitungswasser bietet sich an, da dieses verfügbar ist und eine relativ konstante Temperatur aufweist. Da das Wasser am Ende des Schlauchsystems direkt in den Ausguss gefördert wird, kommt es zu einem hohen Wasserbrauch und damit verbunden zu einer relativ hohen Belastung der Umwelt. Bei jeder Messung am *ElliRec* werden mindestens 570 Liter Trinkwasser verbraucht. Am *OptiRec* sind es durch die verkürzte Messzeit vergleichsweise weniger, aber dennoch mehr als 140 Liter pro Messung. Dieser Verbrauch könnte drastisch gesenkt werden, würde das Wasser im Kreis gepumpt. Ein anderer Aspekt, der ein verbessertes Konzept eines Wasserkreislaufs noch dringlicher macht, ist die zunehmend unzureichende Konstanz der Wassereintrittstemperatur. Da es für die Qualifizierung von Parabolrinnenreceivern noch keine normierten Verfahren gibt, hat man sich beim Messprinzip für die Prüfstände *ElliRec* und *OptiRec* an der bestehenden DIN EN 12975-2 für thermische Solaranlagen und ihre Bauteile orientiert. Darin ist unter anderem festgelegt, dass die Eintrittstemperatur während einer Messung eine maximale Differenz von  $\pm 0,1$  K aufweisen darf. Dieses Messkriterium kann mit zunehmender Häufigkeit nicht eingehalten werden und verursacht immer häufiger ungültige Messungen. Diese müssen anschließend wiederholt werden, was einen deutlich erhöhten Zeit- und Kostenaufwand bedeutet. Somit ist ein Konzept eines Wasserkreislaufs notwendig, durch welches die Eintrittstemperatur des Wassers in den Receiver mit entsprechend hoher Genauigkeit eingestellt und konstant gehalten werden kann.

Weiteres Optimierungspotential besteht in Verbindung mit dem Massenstrom. Als Messkriterium ist ein Sollwert von 850 kg/h definiert. Die tolerierte Differenz liegt bei  $\pm 5$  kg/h, um die dieser Wert während der Messphase schwanken darf. Bisher wird der Massenstrom über einen Kugelhahn am Ende der Schlauchleitung auf den geforderten Wert gedrosselt. Das Einstellen des Massenstroms mit dieser Methode erfordert jedoch enorm viel Feingefühl. Zusätzlich ist regelmäßige Kontrolle nötig, da der eingestellte Massenstrom mit der Zeit leicht absinkt und somit den Toleranzbereich verlassen kann, was wiederum zu ungültigen Messungen führt. Aus diesem Grund soll ein neues Konzept für die Wasserversorgung auch eine verbesserte Einstellbarkeit und Konstanz des Massenstroms beinhalten.

Als wichtige Komponente dieses Wasserkreislaufs bedarf auch die Receiverhalterung weiterer Verbesserung. Diese wird im folgenden Abschnitt 2.6.3 ausführlich thematisiert.

### **2.6.3 Halterung für Parabolrinnenreceiver**

Anders als in Parabolrinnenkraftwerken, ist es in den Prüfständen nicht sinnvoll die Receiver durch Schweißen zu fixieren. Der unverhältnismäßig hohe Aufwand des Schweißens, sowie der Anspruch der zerstörungsfreien Messung lassen dies nicht zu und erfordern somit eine Halterung zum Einspannen von Receivern. Die Halterung muss im Wesentlichen zwei Aufgaben erfüllen. Zum einen soll der Receiver durch sie positioniert und gehalten werden, zum anderen soll sie das als Wärmeträgermedium genutzte Wasser in den



Receiver ein- und wieder ausleiten. Somit muss sie den Receiver abdichten können und gleichzeitig leicht zu lösen sein. Die bisherigen Versionen der Receiverhalterung und bereits realisierte, sowie noch offene Verbesserungen werden auf den folgenden Seiten beschrieben.

Die erste Version der Receiverhalterung wurde bei der Entwicklung des *ElliRec* [MAC 08] entworfen, ist in Abbildung 2.11 zu sehen und verhältnismäßig simpel gehalten. Den Kern bildet ein Halterohr aus Edelstahl, welches mit einem Durchmesser von 14 mm im Inneren und 24 mm an der Außenseite ausgeführt ist. An einem Ende (links) ist ein Innengewinde

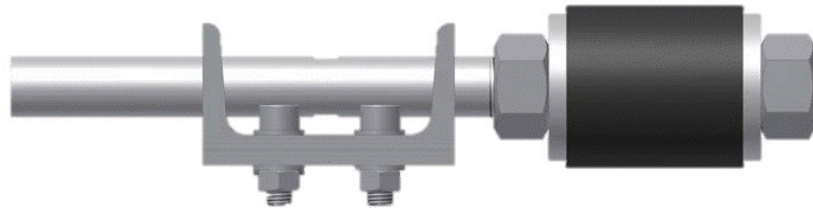


Abbildung 2.12: Receiverhalterung des ElliRec

vorgesehen um die Verbindung zum Schlauchsystem herzustellen. Das andere Ende (rechts) ist mit einem Außengewinde versehen, welches die Grundlage für das Verschlussystem bildet. Dieses wird durch einen Hohlzylinder aus Gummi, in Abbildung 2.11 schwarz dargestellt, zwei Stahlscheiben und zwei Rohrmuttern realisiert. Die Halterung wird in den Receiver eingeschoben, bis der Gummi vollkommen eingetaucht ist. Wird die linke Mutter angezogen, so wird der Gummi zwischen den Stahlscheiben gestaucht, presst sich an die Außenseite des Halterohrs und die Innenseite des Absorberrohrs und dichtet dieses somit ab. Der Einbau der Halterung findet außerhalb des Prüfstands statt. Um den Receiver wie in Abbildung 2.12 gezeigt im Prüfstand zu montieren, muss er zunächst von zwei Personen



Abbildung 2.11: Montierte Receiverhalterung im ElliRec

hinein getragen werden. Im Inneren wird die Halterung über ein U-Profil mit dem Prüfstand verschraubt. Eine Bohrung im U-Profil dient als Lagerung für das Halterohr. Um eine eventuelle Längenausdehnung aufgrund der Temperatureinwirkung aufnehmen zu können, ist die abgebildete Halterung als Loslager und die Gegenseite als Festlager ausgeführt. Außerdem im Bild zu sehen, sind auf der linken Seite das montierte Absorberrohr und rechts die angeschraubte Wasserversorgung. Die Arbeitsschritte zum Receiverwechsel dauern bei geübter Handhabung ca. 20 Minuten. Die Vereinfachung dieser Handgriffe, sowie die Reduzierung der Distanz zwischen dem Receiver und den Temperaturmessstellen stellen die nötigsten Verbesserungen dar.



Mit der Entwicklung des *OptiRec* wurde auch die Receiverhalterung überarbeitet [ANT 12], aufgrund von zu hohen Fertigungskosten letztlich aber nur in den Grundzügen übernommen und in einer vereinfachten Version für die erste Version des *OptiRec* umgesetzt [HAP 12]. Diese zweite Version der Receiverhalterung ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Die Methodik des Verschlusssystems, bestehend aus dem Gummihohlzylinder zwischen Scheiben und Muttern auf einem Halterohr, wurde übernommen. Das Halterohr wurde auf einen Außendurchmesser von 44,5 mm und einen Innendurchmesser von 33,5 mm vergrößert,

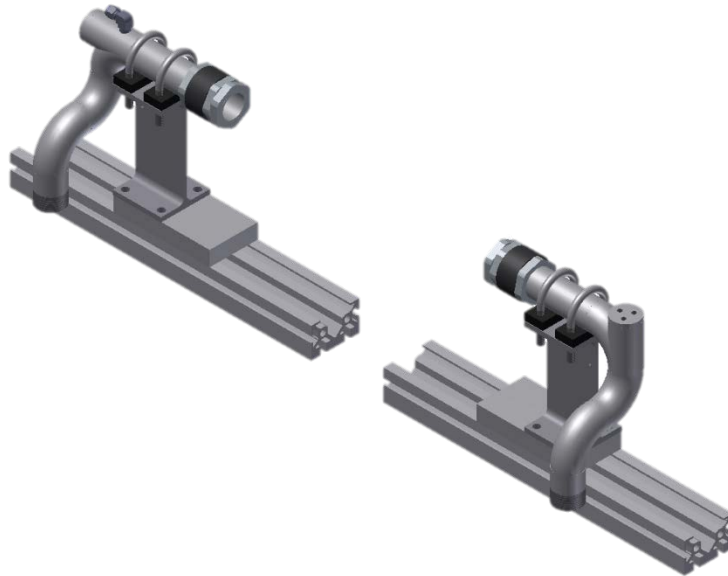


Abbildung 2.13: Receiverhalterung des *OptiRec* für Eintritt (rechts) und Austritt (links)

sodass die entsprechenden Komponenten in ihren Abmessungen angepasst werden mussten. So konnte der Druckverlust im System nochmals deutlich gesenkt werden [ANT 12]. Zusätzlich wird so auch die Entlüftung des Receivers verbessert, da die Luft durch den vergrößerten Querschnitt leichter austreten kann. Die noch im System vorhandene Luft sammelt sich in strömungsrichtung am höchsten Punkt, der Austrittsseite der Halterung. Dort ist ein Rohrwinkel angeschweißt, der mit einem Entlüftungsventil verbunden wird, über das die Luft entweichen kann. Das Halterohr wiederum wird zwischen Rohrbügeln und einer Unterlage aus PVC-U eingespannt und mit einem I-Profil nach DIN 1026 verschraubt. Das Profil ist auf den Laufwagen einer Linearführung montiert. Die Halterung ist über diese Linearführung fest mit dem Prüfstand verbunden. Dies hat den Vorteil, dass beim Wechseln des Receivers dieser nicht mehr getragen werden muss, sondern mit einer Montagehilfe in der Fokallinie positioniert werden kann. In dieser Position gehalten, muss die Receiverhalterung nur noch eingeschoben, bzw. herausgezogen werden. Dieser Aufbau stellt eine entscheidende Verbesserung der Bedienbarkeit und Verkürzung der Umbaudauer dar.

Um die auf 250 mm begrenzte Länge, des in der Fokallinie befindlichen Teils der Halterung, einhalten zu können, ist ein Ende des Halterohrs mit einer Rohrverzweigung versehen. Die dadurch entstehende Öffnung ist mit einer Ronde verschlossen, welche über drei Bohrungen zum Einschrauben der PT100-Temperaturmessfühler verfügt. Die Temperaturmessung findet an der Spitze der Sensoren statt, welche der Strömung entgegengesetzt montiert sein sollen [HAP 12]. Deshalb ist die Halterung an Ein- und Austritt unterschiedlich ausgeführt, wie in Abbildung 2.14 zu sehen. Auf diese Art verbaut, ragen die Messfühler etwa 100 mm in das Rohr hinein und befinden sich somit genau im Strömungsquerschnitt. Auf diese Weise wird die Distanz zwischen Messstelle und Receiver auf jeweils maximal 160 mm verringert. Dadurch sind thermische Wechselwirkungen mit der Umgebung und der Bedarf an Isolation gering.

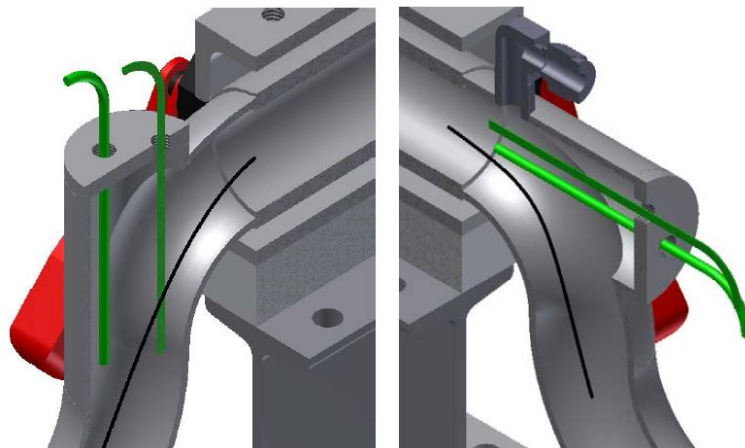


Abbildung 2.14: Integrierte Temperaturmessstelle der Receiverhalterung  
links Eintritt, rechts Austritt [ANT 12]

Eine zusätzliche thermische Entkopplung stellt die Unterlage des Halterohrs aus PVC-U dar. Die Rohrleitung wird durch diese Unterlage mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,17 \text{ W/mK}$  wesentlich besser isoliert als im *ElliRec*. Das dort zur Lagerung verwendete U-Profil weist im Vergleich eine Wärmeleitfähigkeit von  $50 \text{ W/mK}$  auf, da es aus Stahl besteht [ANT 12].

### 3 Neukonstruktion der Receiverhalterung

Beim Aufbau der zweiten Version des *OptiRec* im *QUARZ-Zentrum* des DLR in Köln soll basierend auf den bisherigen Erfahrungen eine neue Version der Receiverhalterung als wichtiger Teil des Wasserkreislaufs entwickelt werden. In Kapitel 2.6.3 wurden bisherige Versionen der Receiverhalterung detailliert beschrieben und dargestellt, dass bei dieser wichtigen Komponente noch Verbesserungspotential besteht. Im Folgenden wird zunächst kurz zusammengefasst, welche Anforderungen an die neue Receiverhalterung gestellt werden und anschließend der Verlauf des Entwicklungsprozesses aufgeführt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der realisierten Verbesserungen und den noch offenen Arbeitsschritten.

#### 3.1 Umzusetzende Anforderungen

Die Analyse der bestehenden Receiverhalterung ergibt die im Folgenden aufgeführten Aspekte, die bei der Neukonstruktion berücksichtigt werden sollen:

- Die Basis der bestehenden Receiverhalterung aus einem I-Profil bietet ohne weitere Bearbeitung, wie Bohren oder Schweißen, keinerlei Möglichkeit um zusätzliche Anbauten wie Isolation oder Strahlenschutz anbringen zu können. Der Laufwagen ist nur bedingt in der Lage seitlich angreifende Kräfte, wie sie beim Verschieben des Schubladensystems auftreten, aufzunehmen. Außerdem sind nicht alle Bestandteile des Linearführungssystems für den ständigen Kontakt mit Wasser ausgeführt.
- Das Rohrgewinde aus Edelstahl zum Stauchen des Gummihohlzylinders führt durch Verschleiß immer häufiger zu Problemen wie Undichtigkeit oder Verklemmen. Das Gewinde musste hier bereits mehrfach nachgeschnitten werden.
- Die Abmessungen von Halterrohr und Spannsystem sollen auch die Messung von Receivern mit größeren Wandstärken ermöglichen, wie sie beispielsweise bei Receivern für Direktverdampfung nötig sind. Dies ist mit der bisherigen Halterung aufgrund des Durchmessers der Rohrgewindemuttern nicht möglich.
- Eigenschaften, die von der bestehenden Receiverhalterung übernommen werden sollen sind:
  - Integration der Temperaturmessstelle
  - Entlüftung des Receivers
  - Vereinfachte Bedienung zur Verkürzung der Messzeit
  - Messbarkeit von Receivern bis zu einer Länge von 5 m
- Der *OptiRec* bietet noch viele andere Stellen mit Verbesserungsbedarf, weshalb möglichst geringe Kosten für die Fertigung der Receiverhalterung angestrebt werden.

### 3.2 Entwicklungsprozess

Die für eine Überarbeitung der Receiverhalterung zunächst anstehende theoretische Entwicklung erfolgt mithilfe der 3D-CAD-Software *Autodesk Inventor*. Mit dieser Software lassen sich räumliche Modelle erzeugen und zu Baugruppen zusammenfügen. Außerdem ist das Erstellen von technischen Zeichnungen der erzeugten Modelle möglich. Ein umfangreicher Normteilkatalog, sowie von Unternehmen bereitgestellte CAD-Modelle ihrer Produkte können für die Konstruktion genutzt werden. Die technischen Zeichnungen der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Bauteile sind im Anhang hinterlegt.

Die in Abbildung 3.1 gezeigte Gesamtdarstellung der Receiverhalterung dient als eine erste Übersicht und zum besseren Verständnis der auf den folgenden Seiten beschriebenen Entwicklungsschritte.

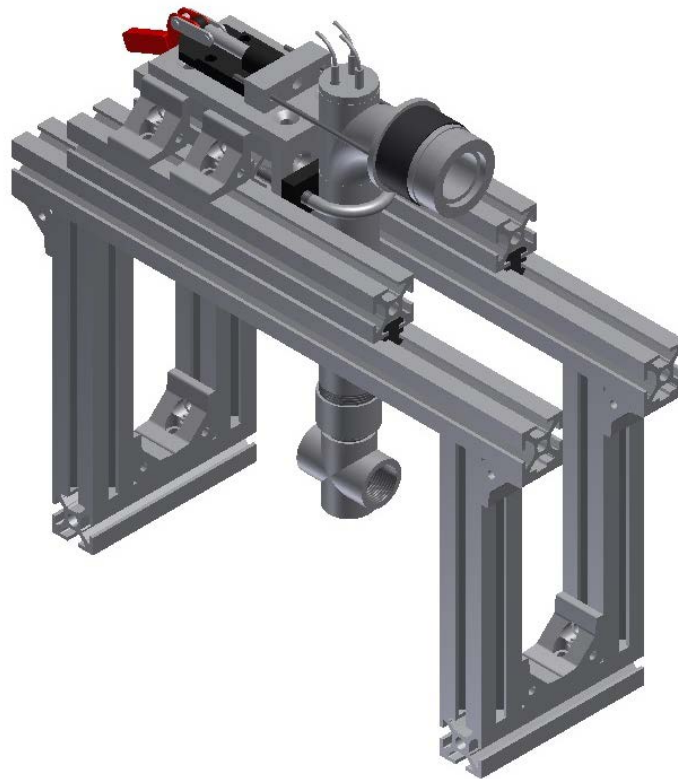


Abbildung 3.1: Gesamtdarstellung der Receiverhalterung (Eintrittsseite) ohne Verbindungselemente

## Grundstruktur

Grundlegendes Konstruktionselement des gesamten Prüfstands ist die Profiltechnik der *Maschinenbau Kitz GmbH*. Da bereits viel Erfahrung mit den sogenannten mk-Profilen gesammelt wurde und sich diese bei der Realisierung verschiedener Prüfstände bewährt haben, soll auch die Grundstruktur der Receiverhalterung darauf aufbauen. Neben der somit unkomplizierten Integration in den Prüfstand, wird durch die Nuten in den Umfangsflächen auch eine Vielzahl von Möglichkeiten geschaffen, die Halterung erweitern zu können.

Die einzelnen Komponenten der Grundstruktur sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Verbindungselemente wie Schrauben und Muttern sind im Sinne der Übersichtlichkeit nicht abgebildet. Die Basis bildet nicht länger ein I-Profil, sondern ein vergleichsweise massiv ausgeführtes mk-Profil (A) mit einer Höhe von 160 mm und einer Breite von 80 mm. Die Länge beträgt 120 mm auf der Eintrittsseite und 160 mm auf der Seite des Austritts, was in der unterschiedlichen Ausführung der Rohrleitung begründet ist. Zur Befestigung der Rohrleitung werden weiterhin die Rohrbügel (B) und Auflagen (C) aus PVC genutzt, welche auch bei der bestehenden Receiverhalterung verwendet wurden. Diese werden über eine Adapterplatte (D) an der Stirnseite der Basis befestigt. Um das Anziehen der Rohrbügel über Muttern zu ermöglichen, werden an der Basis zwei Seitenkanten bis zu einer Tiefe von 20 mm ausgeklinkt. An der Oberseite der Basis wird eine weitere Adapterplatte (E) angebracht, an der ein Teil des Verschlusssystems montiert wird.

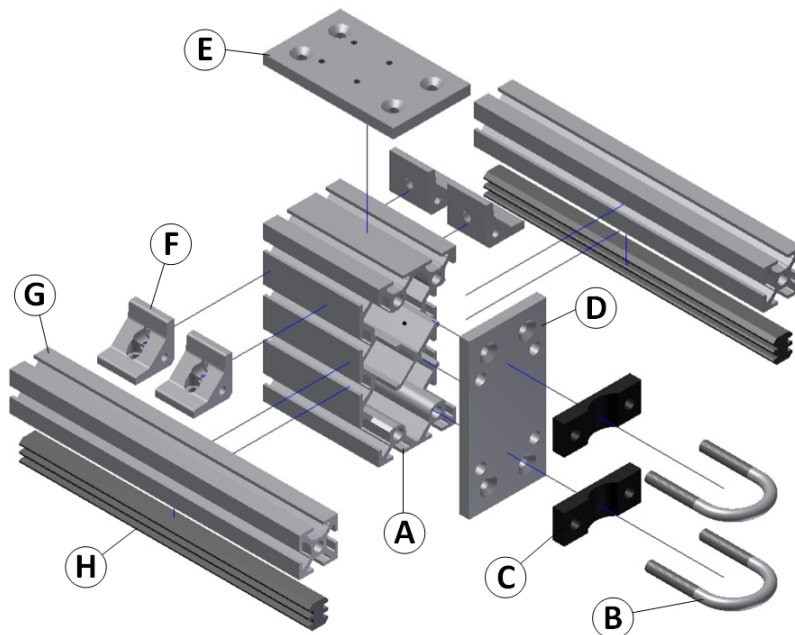


Abbildung 3.2: Explosionsdarstellung der Grundstruktur (ohne Verbindungselemente)

Zur stabilen Lagerung werden über Winkel (F) zwei Profile (G) mit einem Querschnitt von 40 mm x 40 mm an den Seitenflächen der Basis angebracht. In der Nut an der Unterseite befindet sich eine Gleitleiste (H) aus PE-UHMW, welche die Grundlage für die Linearführung bildet. Die Gleitleiste verbindet über die 300 mm langen Profile (G) die Grundstruktur mit einer Rahmenkonstruktion, wie in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Rahmenkonstruktion ist mit dem Prüfstand feststehend verbunden, sodass der Grundstruktur drei Rotations- und zwei Translationsfreiheitsgrade genommen werden. Die lineare Verschiebung in axiale Richtung des Receivers (Pfeile) bleibt als einziger Freiheitsgrad erhalten.

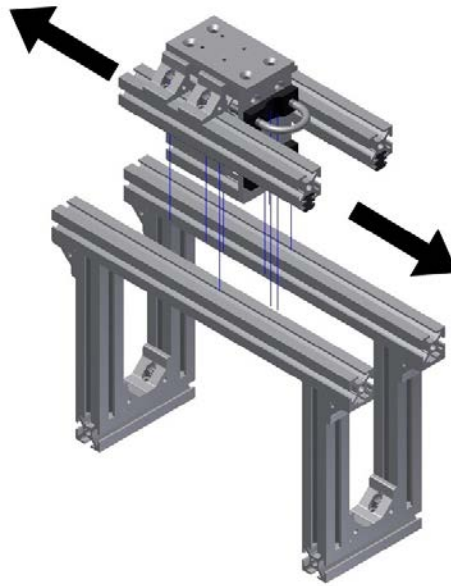


Abbildung 3.3: Getrennte Darstellung von Grundstruktur und Rahmen

Der maximale Verschiebeweg wird durch Sicherungselemente an beiden Enden des Rahmens begrenzt. Das Anbringen eines Strahlenschutzes oder Wasserablaufs an die Grundstruktur, bzw. den Rahmen ist aufgrund der Nuten ohne großen Aufwand möglich. Um Korrosion zu vermeiden bestehen alle Komponenten aus Edelstahl oder Aluminiumlegierungen. Die vereinfachte Umsetzung einer Linearführung senkt die Kosten der entwickelten Grundstruktur im Vergleich zum Vorgänger deutlich.

### Rohrleitung

Die Abmessungen von 43 mm und 38 mm für Außen-, bzw. Innendurchmesser der Rohrleitungen werden von der Vorgängerversion der Receiverhalterung übernommen. Auch Receiver mit einer größeren Wandstärke können damit eingespannt werden. Der Verlauf der

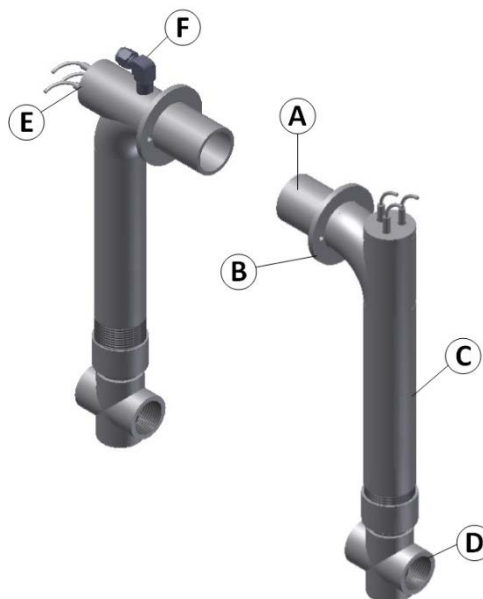


Abbildung 3.4: Rohrleitungen

Leitungen wird jedoch, wie in Abbildung 3.4 zu sehen, stark vereinfacht. So wird das Halterohr (A) auf eine Länge von 60 mm verkürzt und am hinteren Ende mit einem Ring (B)

verschweißt, der als Anschlag für den Receiver und die Dichtung dient. Die Rohrkrümmer am unteren Ende der Halterung werden durch gerade Rohrstücke (C) ersetzt. Diese münden in ein Kreuzstück (D) mit drei weiteren Innengewinden. Hier lassen sich Drucksensor, bzw. -schalter, Kugelhähne zur Belüftung des Receivers, sowie die Schlauchleitungen der Wasserversorgung anschließen. Das Halterrohr und die senkrechten Rohrstücke werden weiterhin über die Rohrverzweigung (E) miteinander verbunden. Diese wurde vom Vorgänger übernommen und verfügt auch weiterhin über eine integrierte Temperaturmessstelle. Wie in Kapitel 2.6.3 beschrieben ist die Ausrichtung der Verzweigung entsprechend der Strömungsrichtung für Ein- und Austritt unterschiedlich, da die PT100-Sensoren entgegen der Strömung ausgerichtet sein sollen. Deshalb sind die Abmessungen der Stützstruktur an Ein- und Austrittshalterung unterschiedlich. Die Entlüftung des Systems erfolgt weiterhin über einen Rohrwinkel (F) an der Austrittsseite der Halterung.

Ein Vorteil der kompakteren Bauweise und des verkürzten Halterohrs ist die Position der PT100-Messfühler, wie die Schnittansicht in Abbildung 3.5 verdeutlicht. So muss auf der Eintrittsseite (rechts) nur noch ein kleines Stück zwischen Messfühlern und Receiver Eintritt isoliert werden. Auf der Austrittsseite (links) kann die Isolation komplett eingespart werden, da die Messfühler bis hinter den Anschlag in das Halterrohr hinein ragen und die Temperatur unmittelbar in der Austrittsöffnung des Receivers messen. Somit werden thermische Störeinflüsse weiter minimiert.

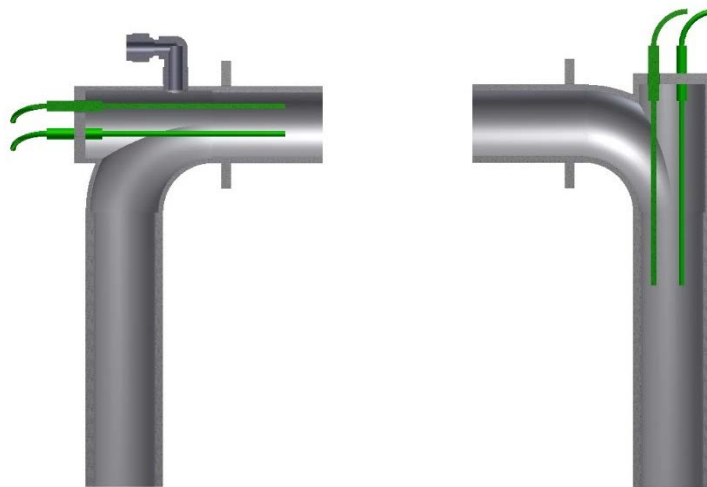


Abbildung 3.5: Schnittansicht der Rohrleitungen

Aufgrund nur geringer Änderungen der Strömungssituation wird angenommen, dass die Druckverluste in beiden Receiverhalterungen nicht signifikant von denen der bisherigen Receiverhalterung abweichen. Daher wird an dieser Stelle auf frühere Berechnungen [ANT 12], [HAP 12] verwiesen. Da eine geringere Anzahl von Rohrstücken auf weniger komplexe Weise miteinander verschweißt werden mussten, konnten auch hier die Kosten gesenkt werden.



## Verschlussssystem

Das Prinzip des Verschlussystems zum Halten und Abdichten des Receivers wurde von den Vorgängern übernommen. Es besteht aus einem Hohlzylinder aus Gummi, welcher gestaucht und somit zwischen Halte- und Receiverrohr gepresst wird. Es folgt eine Neukonzipierung der Methode, mit der die zum Stauchen benötigte Kraft auf den Gummihohlzylinder übertragen wird.

Das neu entwickelte Prinzip der Receiverhalterung wird in Abbildung 3.6 gezeigt, wobei die Verbindungselemente auch hier nicht dargestellt sind. Für den Gummihohlzylinder (A) hat sich eine Härte von 80° Shore A bei den bisherigen Receiverhalterungen bewährt. Die Durchmesser wurden mit 64 mm außen und 43 mm innen beibehalten, die Länge auf 30 mm reduziert. Gestaucht wird der Gummi auf dem Halterohr zwischen dem fest verschweißten Anschlagring (E) und einer Kombination aus einem Ring (B) und einer Hülse (C). Der Ring ist jedoch optional und hier lediglich verbaut, da er denselben Außendurchmesser besitzt wie der Gummi, und somit die Kraft auf eine größere Fläche verteilt als die Hülse mit ihren 60 mm Durchmesser. Diese Kombination kann durch eine Hülse ersetzt werden, die mit 62 mm Außendurchmesser dem Gummi entspricht und eine Länge von 25 mm aufweist. Die zur Stauchung benötigte Kraft wird durch zwei Gewindestangen (D) übertragen. Diese sind am

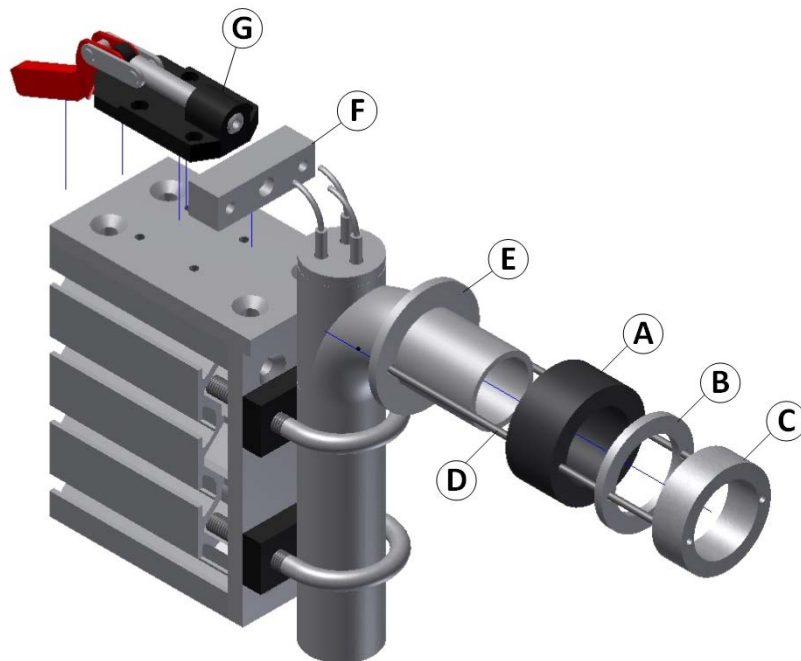


Abbildung 3.6: Explosionsdarstellung Verschlussystem (ohne Verbindungselemente)

einen Ende mit der Hülse (C) verschraubt und werden am anderen Ende an einem Adapter (F) zusammengeführt, welcher an einen Klemmhebel (G) geschraubt ist. Die genauen Daten des Klemmhebels GN 842-160-AS der Firma *Ganter* sind im Anhang hinterlegt.

Die maximale Zugkraft des Klemmhebels beläuft sich auf 2800 N, die sich zu gleichen Teilen auf die beiden Gewindestangen verteilt. Mit Gleichung (2.7) wird für ein metrisches Gewinde M4 an den Gewindestangen und die jeweils maximale Zugbelastung von 1400 N ein Sicherheitsfaktor von 2,8 berechnet. Da die benötigte Klemmkraft aufgrund von Abweichungen



bei der Wandstärke der Receiver variiert, kann diese über die Befestigungsmuttern der Gewindestangen am Adapter (F) angepasst werden.

Dieser Aufbau des Verschlusssystems ermöglicht zusätzlich die Flexibilität Receiver mit anderen Durchmessern aufnehmen zu können. So wird bspw. für die Messung eines Receivers zur Direktverdampfung, aufgrund der dickeren Wandstärke, ein kleinerer Durchmesser an der Halterung benötigt. Zu diesem Zweck können der Gummi und die Hülse einfach durch Varianten mit passendem Außendurchmesser von 56 mm ersetzt werden.

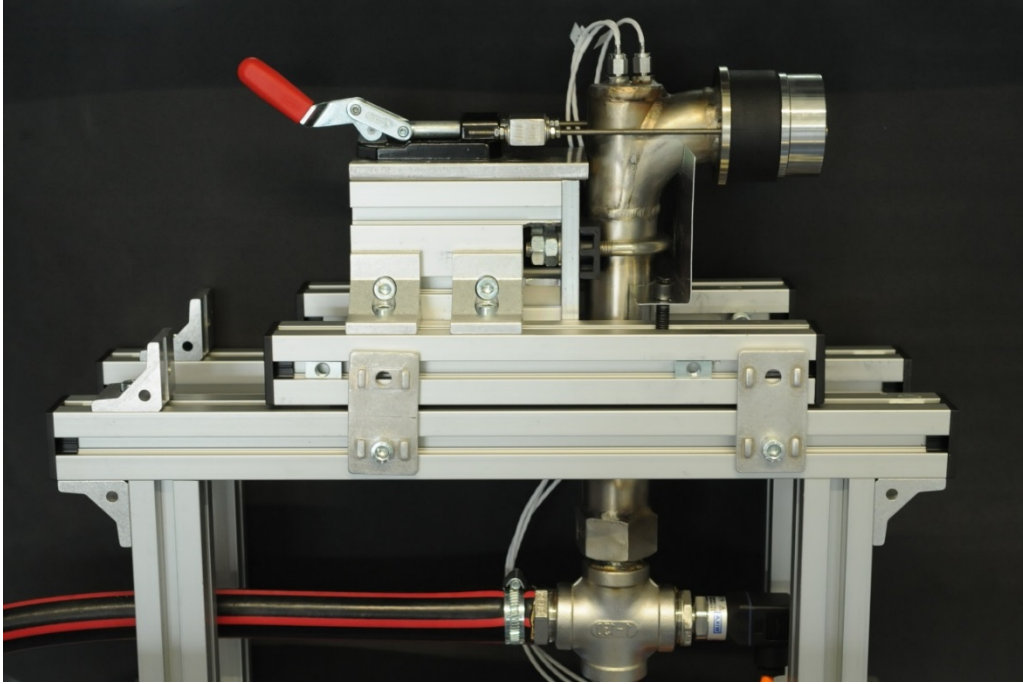
#### **Umsetzung und Test der Receiverhalterung**

Bei ersten Funktionstests der neu konstruierten Receiverhalterung kommt es bei der Kraftübertragung und daraus resultierend bei der Dichtigkeit zu Problemen.

Zur Einleitung der Klemmkraft in den Gummi werden zunächst Stahlseile verwendet, die über den Ring (B), siehe Abbildung 3.6, mit dem Adapter (F) verbunden sind. Diese Stahlseile bestehen aus einem Geflecht feinerer Stahlseile und sind für eine Belastung oberhalb der maximalen Zugkraft des Klemmhebels ausgelegt. Es ist jedoch weder durch Lackieren, noch durch Beschichten mit Silikon möglich diese Verbindung ausreichend abzudichten, da das Wasser im Inneren der Stahlseile fließt.

Dieser Problematik wird mit der oben beschriebenen Kombination aus Gewindestangen und Hülse begegnet. Für diese Ausführung der Receiverhalterung kann in einem Drucktest die Dichtigkeit bestätigt werden. Hierzu wird über Schlauchleitungen die Receiverhalterung mit einer Kreislumpumpe verbunden. Am hinteren Ende der Schlauchleitung wird ein Kugelhahn komplett geschlossen und somit ein für die verwendete Pumpe maximaler Druck von 5,7 bar gemessen, der als Richtwert für den Wasserkreislauf des Prüfstands verstanden werden kann. In Anlehnung an die Entwicklung der Vorgängerversion der Receiverhalterung [ANT 12] wird außerdem mit Hilfe eines Plexiglasrohres, welches den Abmessungen eines Absorberrohrs entspricht, die Entlüftung des Receivers kontrolliert. Der Testlauf ergab, dass auch bei der neu konstruierten Version der Receiverhalterung die Entlüftung des Receivers mithilfe des Entlüftungsventils nach dem Einschalten der Pumpe funktioniert, wenn der Störkörper wie in Abschnitt 2.6.1 beschrieben eingebaut ist.

Die theoretisch entwickelte Receiverhalterung kann letztlich auch gefertigt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Im unteren Teil der Aufnahme ist der Rahmen aus mk-Profilen zu sehen, welcher als Führung für die darüber sitzende Basis dient. Außerdem sind die über Rohrschellen angebrachte Rohrleitung, sowie das Verschlusssystem bestehend aus der Hülse, dem Gummihohlzylinder, dem Anschlagring, den Gewindestangen und dem Klemmhebel abgebildet. Die Pt100-Messfühler sind bereits am oberen Ende der Rohrleitung eingeschraubt. Am unteren Bildrand ist das Kreuzstück mit angeschlossener Schlauchleitung und eingeschraubtem Druckmessumformer zu sehen.



*Abbildung 3.7: Erfolgreich umgesetzte Entwicklung der Receiverhalterung*

### **Zusammenfassung**

- Die Möglichkeit zusätzliche Anbauten wie Isolation, Strahlenschutz oder Wasseraufnahme anbringen zu können wurde durch eine Grundstruktur aus mk-Profilen geschaffen. Die Belastbarkeit und Korrosionsbeständigkeit der Halterung, insbesondere der Linearführung wurde durch Neukonzipierung und ausgewählte Materialien, wie Edelstahl und Aluminiumlegierungen verbessert.
- Das anfällige Rohrgewinde wurde durch ein Hebelsystem ersetzt. Bei diesem System ist für den Wechsel des Receivers kein Werkzeug nötig. Außerdem ist es vergleichsweise wartungsarm, aber gleichzeitig flexibel in Bezug auf die Durchmesser der zu messenden Receiver.
- Die Messung von Receivern mit größeren Wandstärken wird wie oben erwähnt ermöglicht.
- Andere Vorteile, die bei der Entwicklung von *ElliRec* zu *OptiRec* gewonnen werden konnten, werden beibehalten.
- Die anfallenden Fertigungskosten konnten im Vergleich zur vorherigen Version gesenkt werden. Eine exakte Auflistung ist jedoch nicht möglich, da für die vorherige Version keine detaillierten Daten zu den Kosten jeder einzelnen Komponente vorliegen. Die größten Kostenpunkte der Vorgängerversion konnten stark verringert werden, indem zum einen die Linearführungen durch Gleitleisten ersetzt und zum anderen die Anzahl der zu verschweißenden Rohrteile gesenkt wurden.

#### **Anmerkung**

Um die Halterung im Prüfstand betreiben zu können, ist zunächst noch die Realisierung von Isolation und Strahlungsschutz nötig. Dies sorgt zum einen für weitere Minimierung der thermischen Einflüsse aus der Umgebung, aber vor allem schützt es die hitzeempfindlichen Komponenten der Receiverhalterung vor der konzentrierten Strahlung.

Des Weiteren sollte abgeschätzt werden, welche Typen von Receivern in naher Zukunft gemessen werden müssen, um gewährleisten zu können, dass die passenden Komponenten für das Verschlusssystem vorhanden sind.

## 4 Entwicklung des Wasserkreislaufs

Basierend auf der bisherigen, in Abschnitt 2.6.2 beschriebenen, Wasserversorgung werden zunächst die zu verbessernden Aspekte und Anforderungen an die neue Wasserversorgung genannt. Es folgen die Entwicklung eines Konzepts, die Auswahl der einzelnen Komponenten, sowie die Umsetzung und Inbetriebnahme. Am Ende des Kapitels steht eine Betrachtung der realisierten Wasserversorgung in Bezug auf die anfangs formulierten Ziele und Anforderungen.

### 4.1 Umzusetzende Anforderungen

- Der Wasserverbrauch wurde von *ElliRec* zu *OptiRec* bereits gesenkt. Der aktuelle Verbrauch von mehr als 140 Litern pro Messung kann durch die Realisierung eines Wasserkreislaufs noch weiter reduziert werden.
- Durch Orientierung an der DIN EN 12975-2 gilt eine Messung als ungültig, sobald die Eintrittstemperatur des Wassers während der Messphase um mehr als  $\pm 0,1$  K schwankt. Die Temperatur des Leitungswassers erfüllt dieses Kriterium bei Messungen immer seltener, sodass bereits eine Vielzahl von Messungen verworfen werden musste.
- Der Durchfluss des Wassers im Receiver ist während der Messung auf einen Wert von 850 l/h festgelegt, was nach Gleichung (2.1) etwa 850 kg/h entspricht. Die Einstellung dieses Sollwerts, über Herunterdrosseln des Durchflusses per Kugelhahn am Ende des Leitungssystems ist wenig präzise und erhöht den Systemdruck, sowie den Verschleiß der Pumpe. Außerdem liegt die maximal zugelassene Abweichung bei  $\pm 5$  kg/h, was wiederum ständiger Kontrolle bedarf.
- Bei der ersten Generation des *OptiRec* bewährten sich verschiedene Mess- und Sicherheitseinrichtungen. Diese sollen im neuen Wasserkreislauf wieder Verwendung finden. Neben einer Druckmessung vor dem Receiver, wird eine Sicherheitsschaltung, sowie Notabschaltung der Lampen und anderer elektrischer Komponenten vorgesehen.

Die genannten Punkte fließen in die folgende Konzeptionierung ein und sollen bei der Entwicklung der neuen Wasserversorgung umgesetzt werden.

## 4.2 Konzeptionierung

Ein erstes, grundlegendes Konzept wird basierend auf der bisherigen Wasserversorgung erstellt und ist in Abbildung 4.1 gezeigt. Die Idee besteht darin, bewährte Komponenten erneut einzusetzen. So soll eine Schlauchleitung vom Wassertank über die Kreislpumpe und den Receiver im Kreis geführt werden. Sofern keine drehzahlgesteuerte Pumpe zum Einsatz kommt, ist auch weiterhin eine Drosselung des vorhandenen Durchflusses notwendig. Dies ist hier durch den Kugelhahn vor dem Rücklauf in den Wassertank angedeutet. Der Aufbau eines Kreislaufs stellt die einzig sinnvolle Möglichkeit dar, den vorliegenden Wasserverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren. Durch die vom Receiver absorbierte Wärme steigt die Wassertemperatur während einer Messung kontinuierlich an. Die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs hängt dabei direkt vom Volumen des Wassertanks ab. Um während einer zehnminütigen Messphase den aus der DIN EN 12975-2 vorgegebenen Temperaturhub von maximal 0,2 K einhalten zu können, wird ein Tank mit einem Fassungsvermögen von mindestens 5000 l benötigt. Der damit verbundene Aufwand übersteigt den erzielten Nutzen bei Weitem. Die Energie, die über den Receiver in Form von Wärme eingetragen wird, muss dem Wasserkreislauf deswegen an einer anderen Stelle wieder entzogen werden.

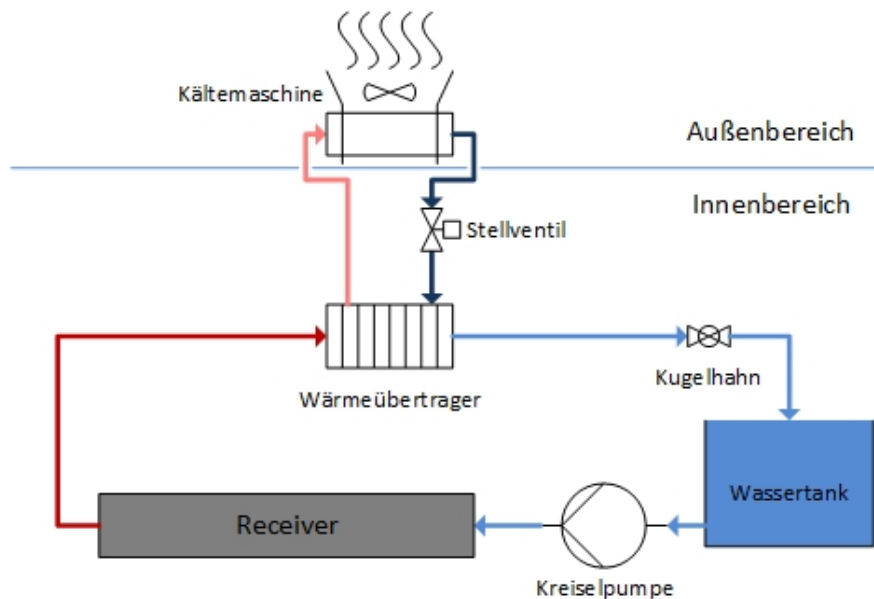


Abbildung 4.1: Grundkonzept des Wasserkreislaufs

Um diesen Wärmeentzug zu realisieren ist in obiger Darstellung ein Wärmeübertrager vorgesehen. Der geringste Aufwand entsteht, wenn die sekundäre Seite des Wärmeübertragers mit Leitungswasser gespeist wird, welches die Wärme aus dem Wasserkreislauf aufnimmt. Eine solche Lösung ist jedoch in Bezug auf den zu reduzierenden Wasserverbrauch nicht zweckmäßig. Daher wird zunächst eine Kältemaschine außerhalb des Labors eingeplant. Diese kann entweder über ein Kältemittel zur direkten, oder über einen zusätzlichen Kaltwasserkreislauf zur indirekten Kühlung des Prüfstandskreislaufs eingesetzt werden. Da der Durchfluss im Prüfstandskreislauf nicht variiert werden kann, ist in beiden Fällen ein elektrisches Stellventil nötig, um die zu übertragende Wärmeleistung genau einstellen, bzw. steuern zu können.

Ein Nachteil bei diesem Konzept ist der Umgang mit giftigen Stoffen. Bei der direkten Kühlung muss mit dem Kältemittel gearbeitet werden. Bei der indirekten Kühlung ist aufgrund der Außenaufstellung zusätzlich der Kaltwasserkreislauf mit Frostschutzmittel zu versetzen, um ein Gefrieren im Winter zu vermeiden.

Ein weiterer Nachteil ist der hohe Zeitaufwand, der nötig wäre um ein entsprechendes Regelungskonzept zu entwerfen und umzusetzen. Um den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, wurde nach weiterer Überlegung ein vereinfachtes Konzept entwickelt.

Abbildung 4.2 zeigt dieses vereinfachte Konzept. Es basiert, wie im oberen Teil zu sehen, auf einem sogenannten Kaltwassersatz. Der Kaltwassersatz bildet die Grundlage des Wasserkreislaufs, denn eine erste Recherche ergab, dass er die einzelnen Komponenten aus Abbildung 4.1 in sich vereint. Im unteren Teil von Abbildung 4.2 sind in einer Prinzipskizze die wesentlichen Bestandteile des Kaltwassersatzes dargestellt. So verfügt dieser über einen Tank und eine Pumpe, womit der benötigte Durchfluss für den Kreislauf bereitgestellt werden kann. Die Drosselung erfolgt hier weiterhin über einen Kugelhahn. Der Kaltwassersatz funktioniert nach dem Prinzip einer klassischen Wärmepumpe. Die überschüssige Wärme wird dem Wasser, gleich nach dem Eintritt in den Kaltwassersatz, durch einen Wärmeübertrager entzogen. An diesen ist ein Kältekreislauf angekoppelt. Durch die übertragene Wärme wird wiederum ein Kältemittel verdampft. Dieses wird von einem Kompressor weiter verdichtet, um sich dann im Kondensator wieder zu verflüssigen und die Wärme an die Umgebungsluft abzugeben. Die Entspannung in einer Drossel schließt den Kältekreislauf.

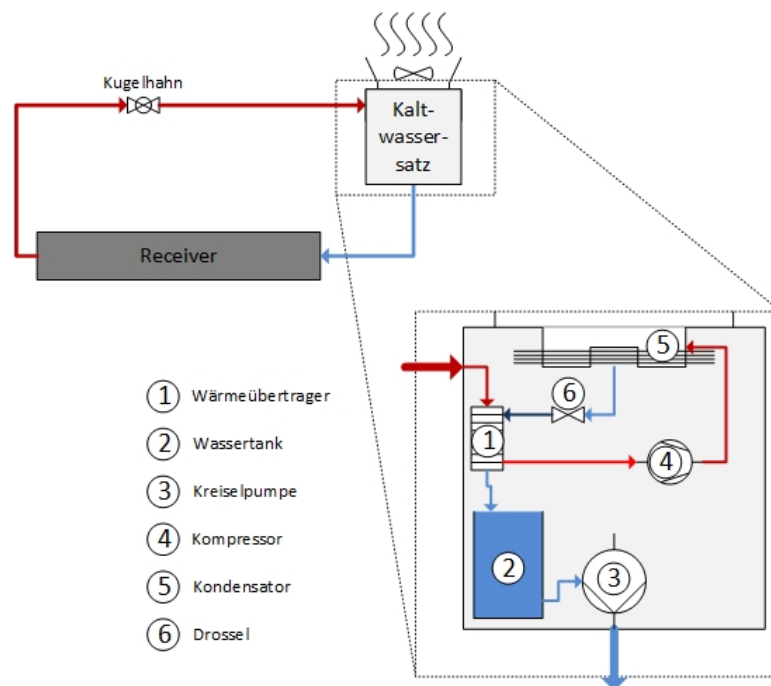


Abbildung 4.2: Vereinfachtes Konzept mit Kaltwassersatz

Die entscheidende Vereinfachung im Vergleich zum Grundkonzept liegt darin, dass die einzelnen Komponenten des Kältekreislaufs bereits vom Hersteller ausgelegt und verbaut werden. Dies gilt auch für die Regelung des Kältekreislaufs. Diese ist bereits ausgelegt und im Kaltwassersatz implementiert. Die maximale Temperaturkonstanz, die mit dieser Regelung erreicht werden kann, ist ein entscheidender Parameter der technischen Daten eines solchen Kaltwassersatzes.

Erste Anfragen bei Herstellern ergeben, dass die benötigte Temperaturkonstanz im Normalfall durch einen Kaltwassersatz allein nicht erreicht werden kann. Die einzigen Geräte, die eine ausreichend genaue Regelung aufweisen, sind für kleine Kälteleistungen im Bereich von maximal 2 kW ausgelegt. Die in Frage kommenden Modelle mit Kälteleistungen bis zu 15 kW sind jedoch vermehrt mit einer Temperaturkonstanz von  $\pm 1,5$  K ausgewiesen. Vereinzelt sind Geräte noch in der Lage  $\pm 1$  K zu gewährleisten. Dies hat zur Folge, dass das bisherige Konzept erneut überdacht und durch zusätzliche Komponenten erweitert wird.

Für dieses erweiterte Konzept wird eine nachträgliche Kompensation der unzureichend genau geregelten Kälteleistung des Kaltwassersatzes eingeplant. Dazu soll die Regelung der Wassertemperatur auf einen Wert unterhalb des Sollwertes erfolgen. Im Anschluss wird die Temperatur über ein Heizelement auf den gewünschten Sollwert angehoben. Diese Korrektur der Temperatur soll durch einen Strömungserhitzer erfolgen, welcher, wie in Abbildung 4.3 zu sehen, im Wasserkreislauf zwischen dem Kaltwassersatz und dem Receiver platziert wird. Der entscheidende Vorteil eines solchen Strömungserhitzers liegt in der sehr genau einstellbaren elektrischen Leistung. Da diese nahezu komplett in Form von Wärme an das Wasser übertragen wird, kann auch die Temperatur genau geregelt werden. Um die somit benötigte Ansteuerung des Strömungserhitzers ermöglichen zu können, wird entsprechende Steuerungs- und Leistungselektronik eingeplant.

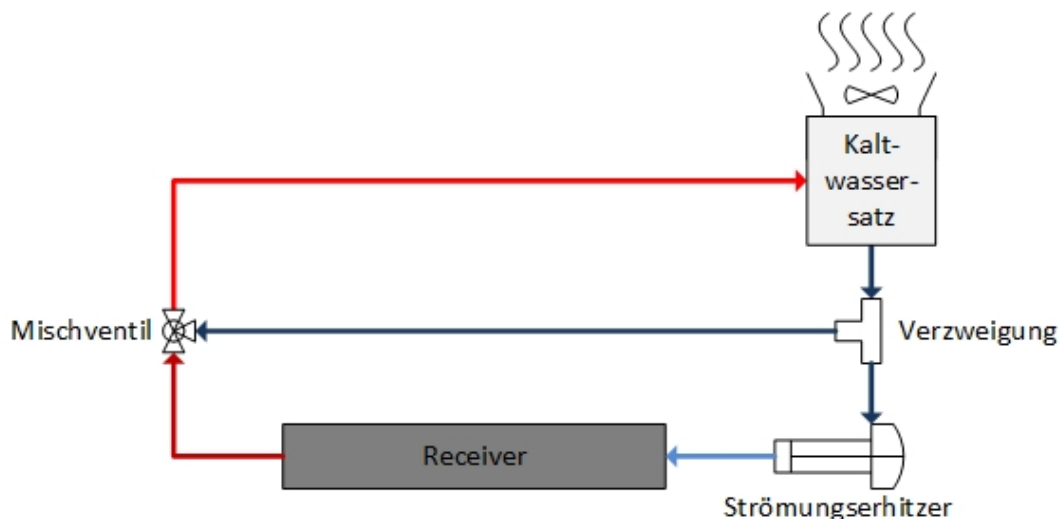


Abbildung 4.3: Erweitertes Konzept

Diese Steuerungselektronik kann zusätzlich auch dazu genutzt werden, den für den Durchfluss im Receiver gewünschten Wert einzustellen und zu halten. Zu diesem Zweck kann der Kugelhahn durch eine entsprechende Variante mit elektrischem Stellmotor ersetzt werden. Das Einstellen des Durchflusses soll jedoch nicht weiterhin per Drosselung realisiert werden, denn durch diese Methode steigen der Systemdruck und der Verschleiß der Pumpe. Gelöst wird diese Problematik, wie in Abbildung 4.3 gezeigt, durch einen Bypass, der über eine Verweigung und ein Mischventil parallel zum Receiver verläuft.

### 4.3 Auswahl der Komponenten

Um die Komponenten den Anforderungen des Wasserkreislaufs entsprechend auswählen und auslegen zu können, wird zunächst eine Bilanz der zu übertragenden Leistung erstellt, welche in Abbildung 4.4 zu sehen ist.

Die größte, dem Kreislauf zugeführte Leistung stellt dabei die von den Lampen ausgehende und vom Receiver aufgenommene Strahlungsleistung dar. Von 15 kW elektrischer Anschlussleistung der Lampen werden nur maximal 7 kW vom Absorber übertragen. Dies wurde in einer Simulation [WEI 11], unter Abschätzung von Wirkungsgrad der Lampen und Formgenauigkeit der Spiegel, bestimmt.

Unter der Annahme dass die Temperaturkonstanz des Kaltwassersatzes bei mindestens  $\pm 1$  K liegt, wurde für den Strömungserhitzer eine Nennleistung von 2 kW vorgesehen. Dies ermöglicht nach Gleichung (2.3) einen Temperaturhub von 2 K, unter der Bedingung, dass der vorgesehene Durchfluss von 850 kg/h vorliegt.

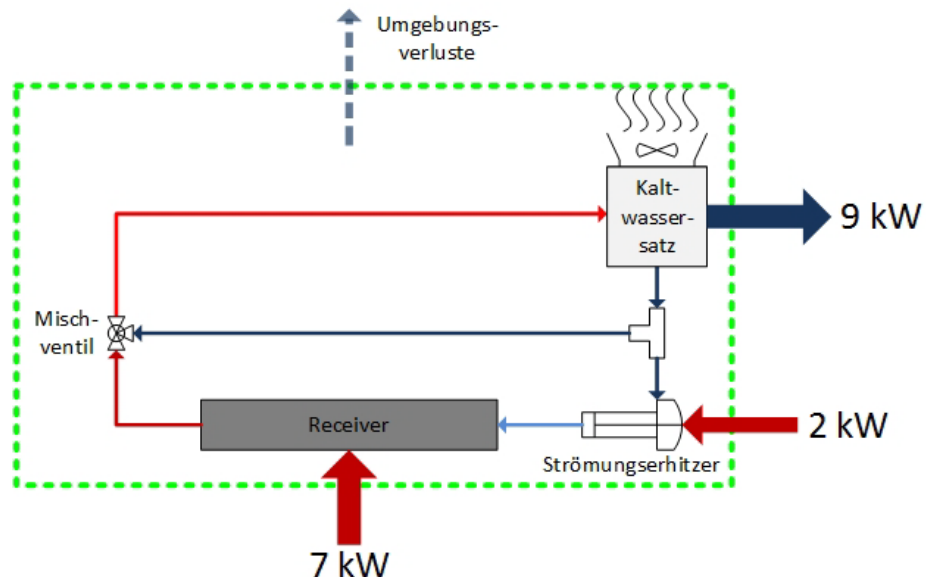


Abbildung 4.4: Bilanz der zu übertragenden Leistung

Somit addiert sich die maximal in den Kreislauf eingetragene Leistung auf 9 kW, was bedeutet, dass diese 9 kW gleichermaßen wieder aus dem Kreislauf abgeführt werden müssen, um die Eintrittstemperatur konstant zu halten. Da dieser Maximalwert an zugeführter Leistung niemals überschritten wird, ist eine entsprechende Nennleistung von 9 kW für den Kältekreislauf des Kaltwassersatzes ausreichend. Dieser Wert deckt sich mit der angepeilten Leistungsklasse, sodass der kostenintensive Sprung in die nächsthöhere Leistungsklasse vermieden werden kann.

Die abgeführte Leistung in Form von Verlusten an die Umgebung hat zwar nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss, wird hier der Vollständigkeit halber aber trotzdem genannt. Lediglich an der Schlauchleitung, die vom Receiver zurück zum Kaltwassersatz führt, treten Verluste auf, da die Wassertemperatur in diesem Abschnitt oberhalb der Umgebungstemperatur liegt. In den restlichen Segmenten liegt die Temperatur auf Umgebungsniveau. Diese thermischen Verluste sind von Vorteil, da somit abgegebene Leistung nicht mehr über den Kältekreislauf des Kaltwassersatzes übertragen werden müssen.



### Kaltwassersatz

Die zentralen Kriterien für die Auswahl des Kaltwassersatzes sind die Kälteleistung und die Temperaturkonstanz, aufgrund eines begrenzten Budgets aber auch die Anschaffungskosten. Ein Großteil der Modelle verschiedener Hersteller wird durch diese drei Kriterien bereits ausgeschlossen. Die meisten können die angestrebte Temperaturkonstanz von mindestens  $\pm 1$  K nicht liefern oder liegen preislich beim doppelten oder sogar dreifachen der anderen Geräte. Weitere Auswahlkriterien sind der Nennvolumenstrom, der oberhalb der benötigten 850 l/h liegen muss, sowie der Pumpendruck, welcher den für die Receiverhalterung getesteten Wert von 5,7 bar nicht überschreiten soll.

Während diese Kennwerte für die wenigsten Geräte und die darin verbauten Pumpen ein Problem darstellen, fallen aufgrund des zulässigen Arbeitsbereichs viele Modelle aus der Betrachtung. Dieser liegt für die Meisten bei einer maximalen Eintrittstemperatur von 20° C, während einzelne auch Temperaturen von bis zu 25° C verarbeiten können. Die Entscheidung fällt somit auf den *ProfiCool Genius PCGE 101.01-NEB* der durch die *National Lab GmbH* hergestellt und vertrieben wird. Ausschlaggebend sind letztlich zwei zusätzlich angebotene Optionen. Zum einen sorgt eine Arbeitsbereichserweiterung dafür, dass auch Temperaturen von 30° C angefahren werden können. Zum anderen wird, über einen Heißgas-Bypass auf der Kältemittelseite, die Temperaturkonstanz auf einen Wert von  $\pm 0,5$  K angehoben. Die wichtigsten Daten des gewählten Kaltwassersatzes sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Auszug aus dem Datenblatt des ProfiCool Genius PCGE 101

Nutzkälteleistung	8,8 kW
Temperaturkonstanz	$\pm 0,5$ K
Arbeitsbereich	5...30 °C
Nennvolumenstrom	1500 l/h
Pumpendruck	3,3 bar

Eine Vorgabe des Sollwerts per analogem Signal von 4 bis 20 mA ist nicht möglich, aber das Ein-, bzw. Ausschalten kann über einen potentialfreien Kontakt realisiert werden. Diese Ansteuerung ist verhältnismäßig wichtig, da der Anschluss einer weiteren Komponente mit einer benötigten dreiphasigen Spannung von 400 V nicht im Schaltschrank des Prüfstands eingeplant ist und der Kaltwassersatz somit an einer zusätzlichen Starkstromsteckdose angeschlossen wird.

Im Betrieb wird ein Schallpegel von maximal 72 dB erzeugt. Dieser Wert deckt sich mit dem Wert der zuvor genutzten Pumpe.

Um das Labor nicht durch die über den Ventilator an der Oberseite des Geräts, abgeführte Wärme aufzuheizen, wurden entsprechende Teile für einen Abluftkanal ausgelegt, sowie die nötigen Umbauarbeiten des betroffenen Fensters bei der Bauabteilung beantragt.

## Leitungen, Armaturen und Gewindefittings

Für die Anbindung der einzelnen Bestandteile des Kreislaufs an die Wasserversorgung des Kaltwassersatzes wird auf die Schlauchleitungen der ersten Generation des *OptiRec* zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um den Wasserschlauch *TRIX-ROTSTRAHL* der *ContiTech AG* mit einer Nennweite von 1 Zoll, was einem Innendurchmesser von 25 mm entspricht. Dieser ist hoch flexibel, UV-beständig und für einen Betriebsdruck von 20 bar, sowie Temperaturen von bis zu 100° C ausgelegt. Da sich die Kennlinien der Pumpe des Kaltwassersatzes und der zuvor verwendeten Pumpe sehr stark ähneln, wird von einer erneuten Bestimmung des Betriebspunkts über die Betrachtung des im System entstehenden Druckverlusts [HAP 12] abgesehen.

Die verwendeten Armaturen, wie Kugelhahn und 3-Wege-Ventil stammen aus dem Angebot der *heco gmbh* [HEC 14]. Gleiches gilt für die zum Anschluss der Schlauchleitung verwendeten Tüllen, diverse Reduzierungen zum Verbinden von Rohrgewinden unterschiedlicher Größe, sowie verschiedene Winkel- und Verzweigungsstücke. Die Ausführungen mit einer Nennweite von 1 Zoll sind für die im Kreislauf herrschenden Drücke und Temperaturen ohne Probleme einsetzbar. Für eine hohe Beständigkeit sind diese aus Edelstahl gefertigt. Zur Abdichtung der Rohrgewinde wird Hanf eingesetzt.

## Erweiterung des Datenloggers

Das zuvor beschriebene Konzept für den Wasserkreislauf sieht eine Ansteuerung des Strömungserhitzers und des Stellventils vor. Der Prüfstand verfügt bisher jedoch nur über Messtechnik zum Erfassen und Auslesen von Sensoren und Messfühlern. Somit ist eine Erweiterung um eine steuernde Komponente notwendig.

Anstelle eines zusätzlichen Geräts eines weiteren Herstellers, wird hier eine Erweiterung des vorhandenen Datenloggers der *Ahlborn GmbH* genutzt. Über die zwei noch verfügbaren Steckplätze, wird der *ALMEMO 5690-2M09* durch ein sogenanntes *RTA5 Trigger-Ausgabe-Interface* wahlweise mit Relais, Triggereingängen oder Analogausgängen ausgestattet. Die vier in der Grundausstattung enthaltenen Schließer-Relais, werden mit sechs optional erhältlichen Analogausgängen kombiniert. Somit wird über ein Signal von 0 bis 10 V oder 4 bis 20 mA die Ansteuerung anderer Komponenten ermöglicht. Außerdem können über die Relais andere Stromkreise, wie zum Beispiel der Steuerstromkreis des Kaltwassersatzes, geschaltet werden. Tabelle 4-2 zeigt die wichtigsten Daten der Datenloggererweiterung.

Tabelle 4-2: Auszug aus dem Datenblatt des RTA5-Adapters

<b>Relais:</b>	4 Halbleiterrelais		
	Schaltspannung	50	V
<b>Analogausgänge:</b>	6 Ausgänge mit 10 V oder 20 mA		
0...10 V	Schrittweite	0,5	mV/Digit
0...20 mA	Schrittweite	0,1	mA/Digit

Das Spannungssignal des Analogausgangs ist in diesem Fall dem Stromsignal vorzuziehen, da es aufgrund der geringeren Schrittweite eine genauere Ansteuerung zulässt. Während die 0,1 mA Schritte eine Aufteilung in 200 Digits erlauben, ermöglicht die Gliederung der Spannung in jeweils 0,5 mV mit 20.000 Digits die hundertfache Auflösung.

Die Programmierung und Bedienung der Relais und Analogausgänge kann direkt am Datenlogger oder über den per USB angeschlossenen Computer vorgenommen werden. Für die Steuerung von Strömungserhitzer und Mischventil soll eine Ansteuerung der Analogausgänge durch das in *LabVIEW* implementierte Überwachungsprogramm des *OptiRec* erfolgen. Bei der Software *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)* handelt es sich um ein grafisches Programmiersystem. Während die Erfassung und Verarbeitung von Daten im Vordergrund steht, bilden Mess-, Regelungs- und Automatisierungstechnik das Hauptaufgabengebiet der Software.

### Strömungserhitzer und Leistungselektronik

Aufgrund der sehr spezifischen Anforderungen ist als Strömungserhitzer kein Seriengerät verwendbar, sondern die Fertigung eines Einzelgerätes von Nöten. Die wesentlichen Anforderungen sind die zu übertragende Leistung von 2 kW, sowie die Auslegung für Wasser als Wärmeträgermedium. Das Strömungsrohr aus Edelstahl ist an beiden Enden mit 1 Zoll Rohrgewinden versehen, um die Schlauchleitung über entsprechende Tüllen anschließen zu können. Ein verbauter Temperaturbegrenzer verhindert unkontrolliertes Aufheizen im Falle einer Störung, wie z. B. Strömungsverlust aufgrund einer Leckage. Die benötigte Versorgung mittels 230 V Wechselspannung ermöglicht den Anschluss im Schaltschrank des Prüfstands. Zusätzlich soll zur gezielten Ansteuerung verschiedener Heizleistungen ein Leistungssteller verbaut werden. In Tabelle 4-3 sind die wesentlichen Daten der Gerätekombination aufgeführt.

Tabelle 4-3: Technische Daten von Strömungserhitzer und Leistungssteller

<b>Strömungserhitzer:</b>	Heizleistung	2 kW
	Betriebsdruck	6 bar
	Versorgungsspannung	230 V AC
<b>Leistungssteller:</b>	Nennstrom	15 A
	Spannungsbereich	24...600 V
	Eingangssignal	0...10 V
		4...20 mA
	Versorgungsspannung	230 V AC

Bei dem ausgewählten Leistungssteller handelt es sich um einen Thyristorsteller des Typs *CD3200*, welcher es durch Phasenanschnitt der 230 V Versorgungsspannung des Strömungserhitzers ermöglicht, dessen Heizleistung stufenlos von 0 bis 100 % zu variieren. Das Eingangssignal des Leistungsstellers liefert der Datenlogger aus einem der

Analogausgänge. Durch die Aufteilung der 10 V in 20.000 Schritte ergibt sich für die Heizleistung eine Schrittweite von 0,1 W, was wiederum einem Temperaturhub von 0,1 mK entspricht.

Hinter dem Strömungserhitzer besteht das Risiko von Temperaturschichtung innerhalb der Strömung, was wiederum an der Temperaturmessstelle vor dem Eintritt des Receivers zu Messfehlern führen kann. Um diese Fehler zu vermeiden wurde ein statischer Mischer vorgesehen. Dieser besteht aus einem Strömungsrohr, welches schräggestellte Leitelemente enthält und somit große Wirbel mit einer intensiven Mischwirkung erzeugt. Über Schlauchtüllen lässt sich ein solcher Mischer problemlos in die Schlauchleitung zwischen Erhitzer und Receiverhalterung integrieren.

### Mischventil

Zur Regulierung des Durchflusses wird der Kugelhahn am Ende der Schlauchleitung durch ein Mischventil und einen Bypasses ersetzt. Während beim Kugelhahn über den namensgebenden Kugelkörper der Öffnungsgrad eingestellt wird, verschiebt sich beim Mischventil ein Kegel zwischen den beiden Eintrittsöffnungen und reguliert somit das Mischungsverhältnis der beiden angeschlossenen Leitungen, sowie den jeweiligen Durchfluss. Da der Durchfluss vor Beginn der Messung eingestellt und dann gehalten werden soll, liegt keine Priorität bei der Stellgeschwindigkeit des Ventils. Die Schrittweite, bzw. die daraus entstehende Genauigkeit der Ventilstellung muss im Gegensatz zum Strömungserhitzer weniger präzise sein.

Die Wahl fällt hier auf ein *Elektrisches Stellventil Typ 3226/5824* der *Samson AG* welches als Mischventil verbaut wird. Es werden zwar 31 Sekunden vom verbauten elektrischen Antrieb benötigt um den Nennhub von 6 mm vollständig abzufahren, jedoch lässt sich der Schaltbereich auf eine ausreichende Genauigkeit von 0,5 % einstellen, was im vorliegenden Fall einem Massenstrom von 7,5 kg/h entspricht und somit im vorgegebenen Toleranzbereich von 10 kg/h liegt. Auch hier werden Schlauchtüllen als Prozessanschluss verwendet und die Grenzwerte für Druck und Temperatur liegen mit 25 bar und 150° C weit oberhalb der Systemparameter. Tabelle 4-4 fasst die Eckdaten der Kombination aus 3-Wege-Stellventil und elektrischem Antrieb zusammen.

*Tabelle 4-4: Technische Daten für das Elektrische Stellventil Typ 3226/5824*

Nenndruck	25 bar
Druckverlust	0,02 bar
Schaltbereich	0,5 %
Eingangssignal	0...10 V
Ausgangssignal	0...10 V

Der elektrische Antrieb verfügt über einen digitalen Stellungsregler, welcher die Zuordnung von Ventilstellung zu Stellsignal gewährleistet. Der Stellungsregler empfängt das Eingangssignal vom Datenlogger und gibt ein entsprechendes Ausgangssignal zurück,

welches durch einen passenden *ALMEMO*-Klemmstecker verarbeitet wird und somit die Überwachung der Ventilstellung ermöglicht. Zusätzlich verfügt der Antrieb über ein Handrad, welches bei Ausfall der Versorgungsspannung eine manuelle Verstellung des Ventilhubes ermöglicht. Über eine kostenfreie Software des Herstellers können Parameter wie Stellgeschwindigkeit und Schaltbereich angepasst und bspw. eine Kennlinienumkehr vollzogen werden.

### Zusammenfassung und finales Konzept

Um die theoretische Planung des Wasserkreislaufs abzuschließen und eine geordnete Übersicht für die folgende Umsetzung zu erhalten, werden die ausgewählten Komponenten und deren wichtigste Eckdaten kurz zusammengefasst. Hierzu wird die in Abbildung 4.4 gebildete Bilanz um die zusätzlich ermittelten Parameter ergänzt, wodurch die aufeinander aufbauende Auslegung der einzelnen Komponenten verdeutlicht wird. Diese überarbeitete Bilanz ist in der folgenden Abbildung 4.5 dargestellt.

Werden die zu übertragenden Leistungen gegeneinander aufgerechnet, so bleibt eine geringe Differenz. Der angenommene Wert für die vom Receiver absorbierte Leistung ist jedoch sehr grob gewählt. Erfahrungen aus dem Betrieb der ersten Version des *OptiRec* haben bestätigt, dass dieser deutlich zu hoch abgeschätzt wurde. Außerdem wird die Leistung im System durch die Umgebungsverluste zusätzlich gesenkt und somit weniger Kälteleistung benötigt. Somit können die ausgewählten Komponenten dennoch als ausreichend dimensioniert angesehen werden. Die Temperatur am Kaltwassersatz wird 1 K tiefer eingestellt als der Sollwert vor dem Receiver. Dadurch ist es dem Strömungserhitzer mit dem maximalen Temperaturhub von 2 K möglich, die Temperaturkonstanz von  $\pm 0,5$  K des Kaltwassersatzes zu kompensieren.

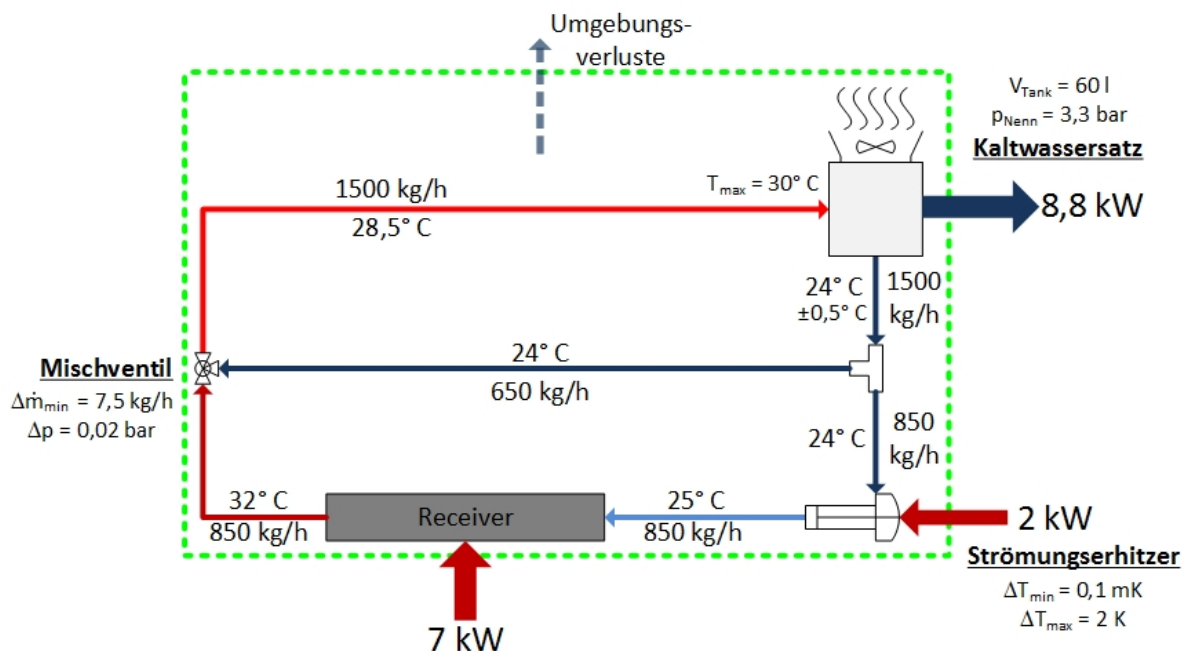


Abbildung 4.5: Detaillierte Bilanz der zu übertragenden Leistung

Ein Vorteil des Mischventils ist der geringe Druckverlust von 0,02 bar. Somit sinkt der Wert auf ein Hundertstel des zuvor vom Kugelhahn verursachten Druckverlusts. Einen

weiteren Vorteil stellt die Vermischung der Massenströme aus Bypass und Receiver dar. Die Temperatur des Bypasses entspricht mit 24° C der Eintrittstemperatur, während die absorbierte Leistung die Temperatur hinter dem Receiver auf 32° C erhöht. Somit ergibt sich nach Gleichung (2.6) eine Temperatur von 28,5° C für den Rücklauf des Kaltwassersatzes. Würde ein Kugelhahn eingesetzt, so müsste die Solltemperatur vor dem Receiver gesenkt werden, um die maximal zulässige Rücklauftemperatur des Kaltwassersatzes einzuhalten, was eine Messung auf Umgebungsniveau nicht möglich machen würde.

## **4.4 Aufbau und Inbetriebnahme**

Die zuvor für den auszulegenden Wasserkreislauf beschriebenen Komponenten werden bei den jeweiligen Herstellern angefragt und bestellt. Für eine erste Inbetriebnahme ist es notwendig diese an entsprechender Stelle zu installieren. Diese Arbeit besteht zum einen aus der Montage einzelner Komponenten an der Tragstruktur des Prüfstands, aber zum überwiegenden Teil aus dem Verlegen elektrischer Leitungen, um die Spannungsversorgung und Signalübertragung der elektrischen Bauteile zu gewährleisten. Des Weiteren wird die Ansteuerung der Komponenten in LabVIEW durchgeführt.

### **4.4.1 Aufbau und Anschluss der Komponenten**

Die Lieferzeit der einzelnen Kreislaufbestandteile wird genutzt um die in Abschnitt 3 entwickelte Receiverhalterung zu fertigen. Anschließend wird diese an Spiegeln und Lampen ausgerichtet und in der unteren Fokallinie des Prüfstands integriert. Auf der Eintrittsseite wird ein Druckmessumformer angebracht und mit dem Datenlogger verbunden. An der Austrittsseite wird ein Druckschalter eingeschraubt, der einen Teil des später beschriebenen Steuerstromkreises darstellt.

Der Coriolis-Sensor, der Strömungserhitzer und das Mischventil werden an geeigneter Stelle mit den mk-Profilen der Prüfstandskonstruktion verschraubt. Zur Spannungsversorgung werden die Geräte mit ausreichend dimensionierter Absicherung im Schaltschrank angeschlossen. Der Leistungssteller wird direkt im Schaltschrank verbaut und verkabelt. Zusätzlich werden auch hier, zu den jeweiligen Signalen passende, Klemmstecker zur Verwendung mit dem Datenlogger angeschlossen.

Der Kaltwassersatz wird in direkter Fensternähe aufgestellt und ebenfalls mit Netzspannung und Steuersignal versorgt. Zur Überwachung der eingeregelter Wassertemperatur wird am Austritt mit einem PT100-Messfühler eine Temperaturmessstelle realisiert. Um ein problemloses Nachfüllen von Frischwasser zu ermöglichen, wird vor dem Rücklauf des Kaltwassersatzes ein 3-Wege-Kugelhahn eingesetzt, welcher über direkte Anbindung an eine Wasserleitung verfügt. Abschließend werden alle Komponenten wie geplant über Schlauchleitungen miteinander verbunden und so der Kreislauf geschlossen.

### **4.4.2 Sicherheitsvorkehrungen**

Um einen sicheren Betrieb des Prüfstands für den Bediener und die elektrischen Bauteile zu garantieren, wird ein Steuerstromkreis mit einer Spannung von 230 V eingerichtet. Dieser steuert über Schütze die Stromversorgung der einzelnen Bauteile. Das bedeutet der

Steuerstromkreis muss geschlossen sein, damit die Bauteile mit Spannung versorgt werden. Um den Steuerstromkreis zu schließen sind für die jeweiligen Komponenten Druckschalter am Schaltschrank angebracht. Über zwei an der Front des Prüfstands verbaute Notausschalter lässt sich der Steuerstromkreis entsprechend unterbrechen um eine sofortige Abschaltung aller Komponenten zu erzwingen. Eine Sicherheitsschaltung aus einem Rollentaster und einem parallel dazu angeschlossenen Druckschalter bewirkt zusätzlich eine Trennung der Spannungsversorgung. Diese greift, sobald der bestrahlte Receiver nicht mehr mit Wasser durchflossen wird, um ein unkontrolliertes Aufheizen des Absorberrohrs bis zu dessen Zerstörung zu vermeiden.

Der genaue Aufbau des Steuerstromkreises, sowie alle weiteren im Prüfstand verbauten und angeschlossenen elektrischen Bauteile, sind dem Schaltplan im Anhang zu entnehmen.

#### 4.4.3 Inbetriebnahme

Bei der ersten Inbetriebnahme des Wasserkreislaufs treten zwei wesentliche Probleme auf. Diese, sowie die gefundenen Lösungen sollen in diesem Abschnitt kurz Erwähnung finden.

Das erste Problem stellt die Pumpe des Kaltwassersatzes dar. Diese läuft außerhalb des optimalen Arbeitsbereiches ihrer Kennlinie. Dieses Problem kommt auf, da der im System entstehende Druckverlust so gering ist, dass an der Pumpe ein zu niedriger Druck anliegt. In Abbildung 4.6 ist die Kennlinie der verbauten Pumpe des Typs PQA70 gezeigt. Der grün

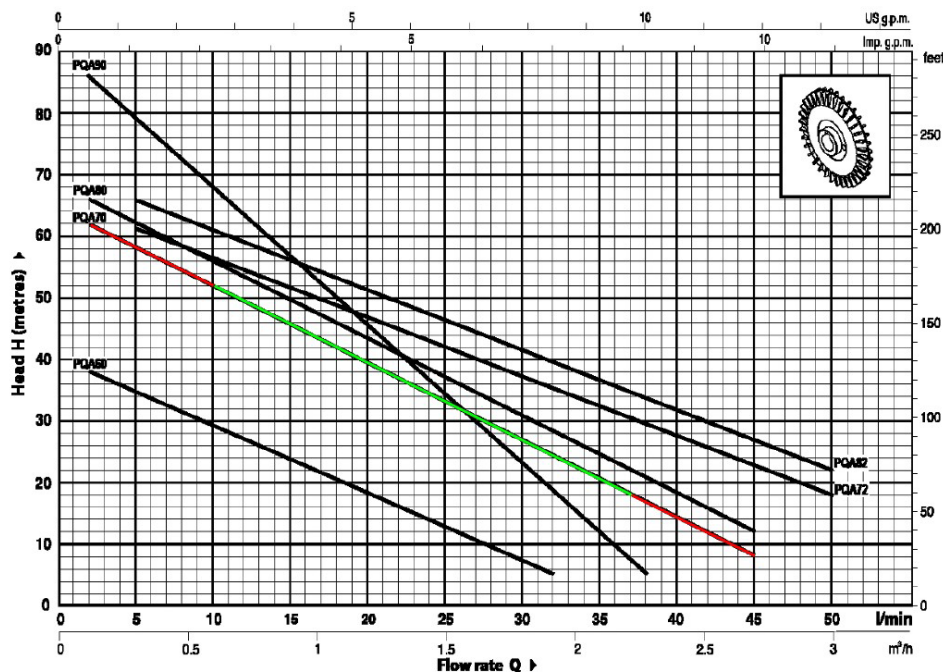


Abbildung 4.6: Kennlinie einer Pumpe des Typ PQA70 mit zulässigem (grün) und unzulässigem Arbeitsbereich (rot)

markierte Bereich signalisiert dabei den optimalen Arbeitsbereich in dem sich die Pumpe bewegen sollte, während die roten Markierungen die jeweils unzulässigen Bereiche am Ende der Kennlinie darstellen. Das Problem wird behoben, indem ein Kugelhahn im Rücklauf des Kaltwassersatzes angebracht und soweit geschlossen wird, bis der Systemdruck bei etwa 2,3 bar und somit im akzeptablen Bereich liegt.

Das zweite, schwerwiegendere Problem liegt in der Kommunikation zwischen dem in *LabVIEW* realisierten Überwachungsprogramm und dem Datenlogger. Da sich das Mischventil über die Tasten am Datenlogger erfolgreich ansteuern lässt, soll ein erster Ansteuerungsversuch vom Computer aus erfolgen. Dieser gelingt zunächst auch, das Signal der Stellungsrückmeldung verändert sich dem gesendeten Steuersignal entsprechend. Nach jedem gesendeten Befehl tritt jedoch eine Störung im Überwachungsprogramm auf, welche nicht direkt zugeordnet werden kann. Die Textdatei, welche die aufgenommenen Messdaten enthält, zeigt ebenfalls Unregelmäßigkeiten zu den Zeitpunkten gesendeter Befehle. Nach weiterer Ursachenforschung im Überwachungsprogramm kann als Fehlerquelle schließlich eine vom Datenlogger ausgegebene Empfangsbestätigung des zuvor gesendeten Befehls ausgemacht werden. Da die empfangenen Daten zur weiteren Verarbeitung in Form eines Strings gesammelt werden, wird auch diese Empfangsbestätigung mitaufgenommen, kann aber aufgrund ihres Formats nicht verarbeitet werden und erzeugt somit den Fehler.

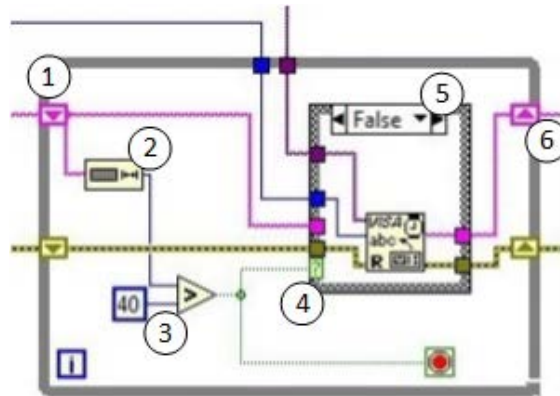


Abbildung 4.7: Kontrolle der Länge des eintreffenden Datensatzes

Das Problem kann behoben werden, indem die am Computer ankommenden Datensätze zuerst überprüft und dann weiter verarbeitet werden. Abbildung 4.7 zeigt wie diese Kontrolle in *LabVIEW* umgesetzt wird. Die Anzahl der Ziffern des eingehenden Datenstrings (1) wird bestimmt (2) und mit einem vorgegebenen Wert verglichen (3). Der Wert von 40 ist hier relativ frei gewählt, wichtig ist nur, dass eine Empfangsbestätigung weniger und ein korrekter Datenstring wesentlich mehr Ziffern enthalten. Ist die Anzahl der Ziffern geringer als 40, so wird ein „false“ ausgegeben (4) und die angezeigte case-Struktur (5) durchlaufen, was dazu führt, dass der Datensatz erneut ausgelesen wird. Somit verfällt die Empfangsbestätigung und die Messdaten können korrekt eingelesen werden. Ist die Ziffernzahl größer als 40 (3) so wird ein „true“ ausgegeben, was wiederum bewirkt, dass der aktuelle Datensatz weitergegeben wird (6) da es sich dabei um korrekte Messdaten handelt.

#### 4.4.4 Ansteuerung - Hardware und Software

##### Lampen und Kaltwassersatz

Über die Halbleiterrelais im *RTA5 Trigger-Ausgabe-Interface* des Datenloggers soll die Ansteuerung der Lampen und des Kaltwassersatzes vom Computer ermöglicht werden. Der Kaltwassersatz kann umgehend mit einem Relais verbunden werden, da er über einen Steuerstromkreis mit einer zulässigen Spannung von 24 V verfügt. Für die Ansteuerung der



Lampen ist jedoch noch eine geringfügige Anpassung des Schaltschranks nötig. Jeweils drei der insgesamt sechs Lampen werden von je einem Schütz geschaltet. Diese Schütze wiederum werden von besagtem Steuerstromkreis mit einer Spannung von 230 V geschlossen. Da die Halbleiterrelais jedoch nur für eine maximale Spannung von 50 V ausgelegt sind, werden zwei zusätzliche Relais im Schaltschrank verbaut. Diese Relais werden auf der einen Seite bei einer anliegenden Steuerspannung von 24 V geschaltet und können auf der anderen Seite eine Schaltspannung von maximal 230V verarbeiten.

Folglich schalten zwei Halbleiterrelais über den 24 V Steuerstromkreis die beiden zusätzlich verbauten Relais. Diese wiederum schließen den 230V Steuerstromkreis und somit die beiden Schütze, welche dafür sorgen, dass die Lampen mit Spannung versorgt werden. Die Ausgabe der passenden Befehle zum Schalten der Halbleiterrelais kann, wie in

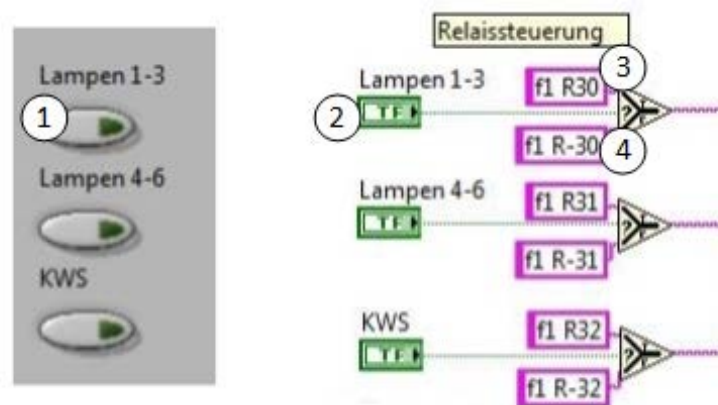


Abbildung 4.8: Programmierte Ansteuerung der Lampen und des Kaltwassersatzes

Abbildung 4.8 zu sehen, in *LabVIEW* umgesetzt werden. Wird ein Schalter auf der Benutzeroberfläche (1) betätigt, so wird für das entsprechende Element (2) ein „true“ ausgegeben, was die Ausgabe des hinterlegten Befehls (3) und folglich das Schließen des Relais bewirkt. Wird der Schalter erneut betätigt, so springt der Wert auf „false“ und der jeweils andere Befehl (4) wird gesendet, wodurch das Relais wieder geöffnet wird. Gleiches gilt für die anderen gezeigten Schalter und die angesprochenen Relais.

### Mischventil

Für die Ansteuerung des Mischventils über den entsprechenden Analogausgang sind von der baulichen Seite her keine weiteren Anpassungen nötig. Das ausgegebene 10 V-Signal kann direkt an den digitalen Stellungsregler des Mischventils übertragen werden. Die in Abbildung 4.9 dargestellte Realisierung im Überwachungsprogramm gestaltet sich jedoch aufwendiger.

Die Vorgabe des Sollwerts erfolgt per Schieberegler oder als direkte Eingabe über die Tastatur (1) und entspricht dem prozentualen Öffnungsgrad des Mischventils. Der eingestellte Wert wird vom Eingabeelement (2) weitergegeben und über eine Multiplikation mit dem Wert 200 (3) in die entsprechende Anzahl an Digits umgerechnet. Somit entsprechen 100 % Öffnungsgrad dem Maximalwert von 20.000 Digits. Die errechneten Digits werden in einen String geschrieben (4) und mit der Information versehen, dass immer fünf Stellen angezeigt werden sollen, auch wenn die ersten eine null sind. Andernfalls kann der Datenlogger den

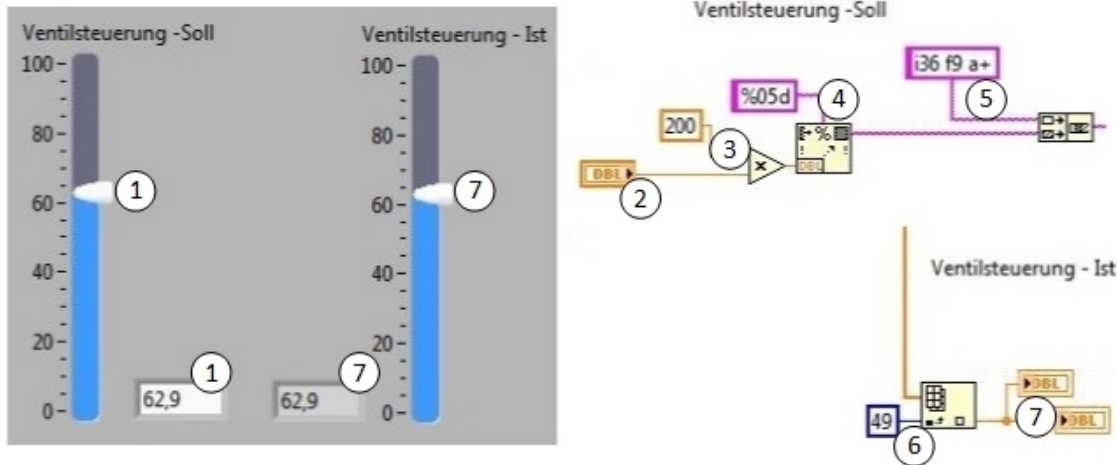


Abbildung 4.9: Programmierte Ansteuerung des Mischventils

ausgegebenen Wert nicht verarbeiten. Anschließend werden die Adresse des angesprochenen Analogausgangs, sowie der Befehl für die Ausgabe eines Signals vor die Digits geschrieben (5) und dieser String an den Datenlogger übertragen. Die Rückmeldung der Position durch den digitalen Stellungsregler wird einem Array entnommen (6) und über die abgebildeten Anzeigeelemente (7) dargestellt.

### Strömungserhitzer

Von Seiten der Hardware kann die Ansteuerung des Strömungserhitzers umgehend erfolgen. Der Thyristorsteller empfängt das analoge Signal des Datenloggers und gibt dieses in Form des entsprechenden Phasenanschnitts an den Strömungserhitzer weiter. Dieser Phasenanschnitt erfolgt stufenlos.

Die Implementierung dieser Ansteuerung in *LabVIEW* erfolgt analog zu der oben beschriebenen Ansteuerung des Mischventils. Eine simple Ansteuerung bei der man den gewünschten Wert per Hand einstellt reicht in diesem Fall nicht aus. Die Aufgabe des Strömungserhitzers ist es die unzureichende Temperaturkonstanz des Kaltwassersatzes zu kompensieren. Dazu wird die Austrittstemperatur des Kaltwassersatzes um 1 K niedriger

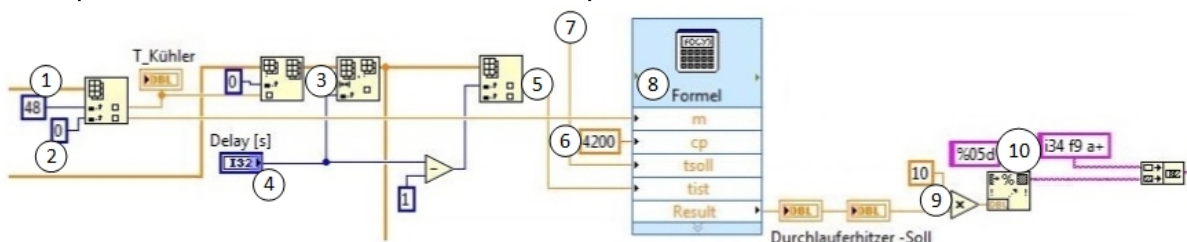


Abbildung 4.10: Programmierte Ansteuerung des Strömungserhitzers

eingestellt als die Solltemperatur vor dem Receiver. Die somit zwischen den beiden Messstellen entstehende Temperaturdifferenz soll durch den Strömungserhitzer ausgeglichen werden. Die Grundlage für diese, in Abbildung 4.10 dargestellte, Steuerung bildet die Gleichung (2.3), denn der Massenstrom wird gemessen, die spezifische Wärmekapazität ist bekannt und der Temperaturhub ergibt sich aus der Differenz zwischen der ebenfalls gemessenen Kühlertemperatur und der Solltemperatur, die am Receivereintritt herrschen soll. Somit kann über die Gleichung die benötigte Leistung berechnet werden. Diese entspricht der Heizleistung, die an das Wasser übertragen werden muss. Zuerst werden dafür die

gemessenen Werte für die Kühler-temperatur (1) und den Massenstrom (2) aus einem Array isoliert. Da aufgrund einer räumlichen Distanz zwischen der Temperaturmessstelle des Kaltwassersatzes und dem Strömungserhitzer folglich auch ein zeitlicher Versatz entsteht, ist es nötig die Messwerte für die Kühler-temperatur zunächst in einem Array zwischenspeichern (3), um sie dann mit dem entsprechenden Delay (4) wieder auszugeben (5). In einem Formeleditor (8) wurde die Gleichung (2.3) eingepflegt. Dieser Formeleditor wird nun mit dem Massenstrom (2), der spezifischen Wärmekapazität (6), sowie der Kühler- (5), als auch der vom Benutzer eingestellten Solltemperatur (7) gespeist. Die Ausgabe der somit berechneten Leistungswerte erfolgt nach dem selben Schema wie beim Mischventil. Da die Werte jedoch in Watt und nicht in Prozent vorliegen, werden diese mit dem Faktor 10 multipliziert (9) um die entsprechenden Digits zu erhalten. Anschließend erfolgt die Formulierung des konkreten Befehls (10) wie bereits zuvor beschrieben.

Der Wert für den zeitlichen Versatz kann über die Gleichung (2.2) aus den jeweiligen Leitungsquerschnitten, den herrschenden Volumenströmen und der räumlichen Distanz zwischen Temperaturmessstelle und Strömungserhitzer berechnet werden. Eine andere Möglichkeit ist die wie in Abbildung 4.11 gezeigte grafische Ermittlung des Zeitversatzes. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Entfernung von der einen Messstelle zur anderen größer ist, als von der Messstelle bis zum Strömungserhitzer.

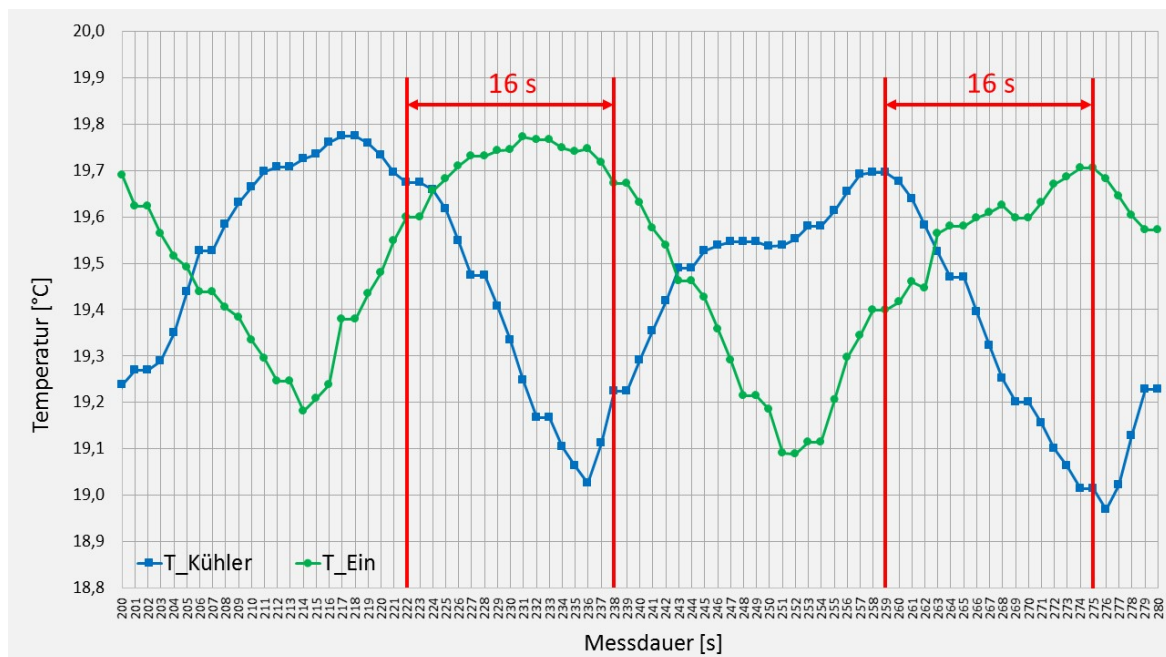


Abbildung 4.11: Zeitlicher Versatz von Kühler- zu Eintrittstemperatur

## 4.5 Ergebnisse

Die erste Inbetriebnahme des Prüfstands war erfolgreich und dabei aufgetretene Probleme konnten behoben werden. Neben den für den Betrieb zwingend notwendigen Komponenten wurden vereinzelte Bauteile, wie Kugelhähne zum Zu- und Abführen des Wassers eingebracht, die den Messbetrieb am *OptiRec* im Allgemeinen vereinfachen können. In Abbildung 4.12 ist der letztendlich realisierte Wasserkreislauf mit nahezu allen Komponenten aufgeführt. Aus Gründen der Übersicht sind die Komponenten der Mess- und Steuerelektronik, wie Leistungssteller und Datenlogger nicht abgebildet.

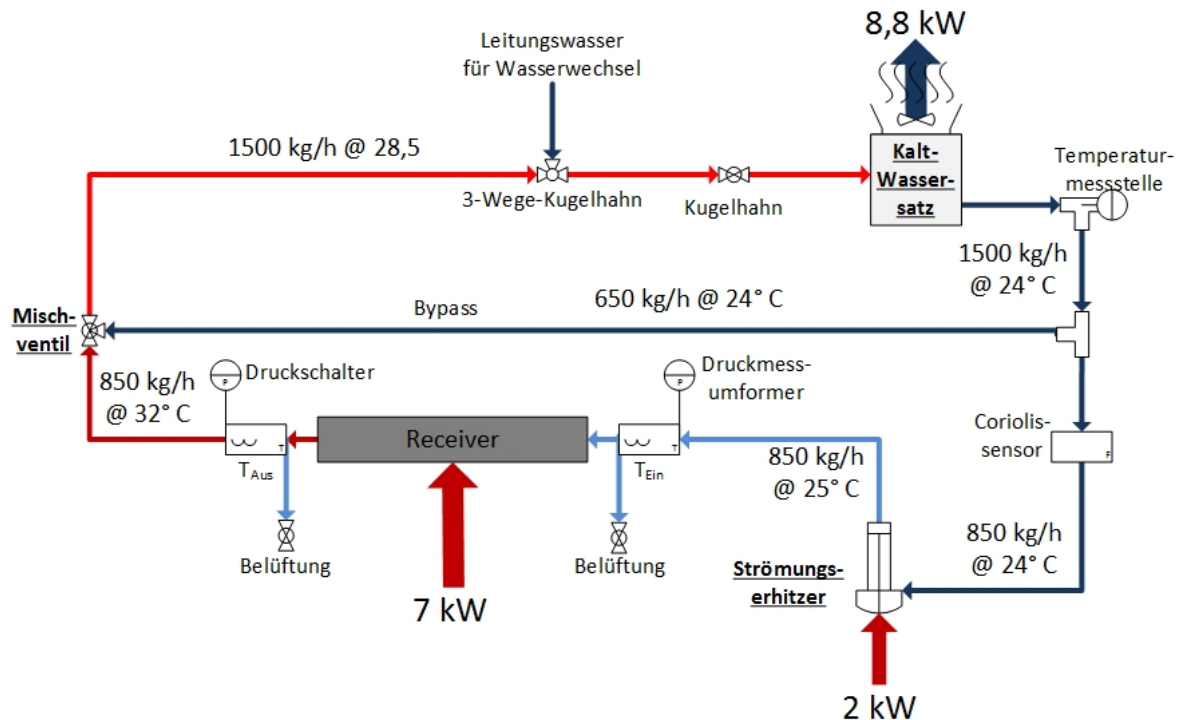


Abbildung 4.12: Realisierter Wasserkreislauf

Während der Kugelhahn am Rücklauf des Kaltwassersatzes lediglich zur Anpassung der Pumpenkennlinie genutzt und demnach auch nicht betätigt werden soll, dient der 3-Wege-Kugelhahn ein Stück weiter vorne in der Schlauchleitung zum Nachfüllen des Wassertanks. Im Normalfall ist die Stellung so gewählt, dass ausschließlich das Wasser durchgeleitet wird. Für den Fall dass der Kaltwassersatz abgeschaltet und der Füllstand des Tanks unterhalb der Sollgrenze liegt, kann die Stellung geändert werden und es wird frisches Leitungswasser direkt über den Rücklauf des Kaltwassersatzes in dessen Tank gefördert. Über diesen Weg sollte regelmäßig der Tankinhalt ausgewechselt werden um Verschmutzungen und Ablagerungen vorzubeugen.

Die zuvor ebenfalls ausgelegten und bei den jeweiligen Herstellern angefragten Komponenten für die Abführung der Abluft des Kaltwassersatzes, sowie der statische Mischer sind hier nicht enthalten, da in Folge einer Budgetkürzung die finanziellen Mittel hierfür nicht ausreichend waren. Eine nachträgliche Integration dieser Bauteile ist bei der aktuellen Ausführung des Wasserkreislaufs jedoch noch jederzeit möglich.

Die in Abschnitt 4.4.4 beschriebene Steuerung des Strömungserhitzers soll zusätzlich auf ihre Effektivität getestet werden. Dazu wird in einem Testlauf der Sollwert für die Eintrittstemperatur

in der Erhitzersteuerung auf 20,5° C eingestellt. Der Kaltwassersatz wird auf eine Temperatur von 20° C geregelt. Es werden die Temperaturverläufe der PT100-Messfühler in der Receiverhalterung und in der Messstelle am Kaltwassersatz aufgezeichnet. An beiden Stellen kommen dieselben hochgenauen Messfühler zum Einsatz. Die Genauigkeit wird mit 45 mK angegeben [HAP 12]. Die Messtechnik kann diese Genauigkeit ebenfalls liefern, da die verwendeten Klemmstecker die aufgenommenen Messwerte bis auf 1 mK genau auflösen können. Der einzige Parameter, der während dieser Untersuchung variiert wird, ist der Delay, der Wert für den Zeitversatz zwischen Messstelle und Erhitzer. Mit der zuvor beschriebenen Methode wurde rechnerisch ein Wert von 11 s ermittelt. Die grafische Auswertung der gezeigten Messung wird aufgrund der zusätzlichen Distanz zwischen Erhitzer und Receiverintritt auf einen Zeitversatz von 14 s festgelegt. Zur Überprüfung dieser Annahmen werden im Versuch verschiedene Werte zwischen 1 s und 17 s für den Delay eingestellt.

Um die aufgenommenen Messwerte vergleichen und bewerten zu können, wurde für die jeweiligen Daten das arithmetische Mittel nach Gleichung (2.8) und die um diesen Wert verteilte Standardabweichung nach Gleichung (2.9) berechnet. Außerdem wurde die jeweilige Differenz zwischen dem Mittelwert und dem kleinsten, sowie dem größten gemessenen Wert der betrachteten Messreihe ermittelt, um die maximalen Ausreißer betrachten zu können. Selbiges wurde für die Temperatur des Kühlers durchgeführt um nach Möglichkeit die Verbesserung sichtbar zu machen.

*Tabelle 4-5: Messwerte eines Testlaufs unter Veränderung des Delays (alles Werte in °C)*

	<b>Mittelwert</b>	<b>Standardabweichung</b>	<b>Abweichung des Kleinsten</b>	<b>Abweichung des Größten</b>
<b>Kaltwassersatz:</b>	19,462	0,441	0,626	0,400
<b>Receiverintritt:</b>				
Delay von 1 s	20,144	0,096	0,315	0,189
Delay von 5 s	20,141	0,087	0,356	0,177
Delay von 6 s	20,142	0,096	0,215	0,188
Delay von 17 s	20,163	0,261	0,502	0,423

Durch die ermittelten Werte zeichnet sich bereits eine signifikante Verbesserung der Temperaturkonstanz ab, da bei allen vier Messreihen der Wert der Standardabweichung für die Temperatur am Receiverintritt deutlich niedriger ausfällt als für den Kaltwassersatz. Zusätzlich sind auch die Werte für die individuellen Ausreißer geringer. Auffällig, aber sicherlich auf die Art der Regelung zurück zu führen, ist die Tatsache dass der Mittelwert für den Kaltwassersatz unterhalb von 19,5° C liegt, obwohl der Sollwert auf einen Wert von 20°C eingestellt war.

Betrachtet man die Messwerte für die Eintrittstemperatur untereinander, so sticht ins Auge, dass die Ergebnisse für die Messreihe bei einem Delay von 17 s mehr als das Doppelte

der anderen Werte betragen. Dies verdeutlicht, dass der gewählte Delay zu hoch angesetzt ist. Anstatt den zeitlichen Versatz zu kompensieren, erzeugt der betrachtete Delay eine weitere Lücke zwischen den beiden Temperaturen und erzielt somit eine vergleichsweise schlechte Temperaturkonstanz.

Betrachtet man die restlichen drei Messreihen, so stellt man fest, dass die jeweiligen Werte für die Standardabweichung bereits der geforderten Konstanz von  $\pm 0,5$  K genügen. Lediglich die maximalen Ausreißer liegen für diesen Grenzwert noch etwas zu hoch. In Bezug auf den eingestellten Delay lassen die ermittelten Werte jedoch keine fundierte Aussage zu. Die verschiedenen Werte liegen zu nah beieinander, obwohl der Delay deutlich verstellt wurde. Auch auffällig ist die Tatsache, dass die Messwerte bei einem Delay von 17 s so viel höher liegen als bei den anderen drei Delaywerten, obwohl die Differenz zu den vorher rechnerisch und grafisch bestimmten Werten mindestens dieselbe, oder im Falle der 1 s sogar die kleinere ist.

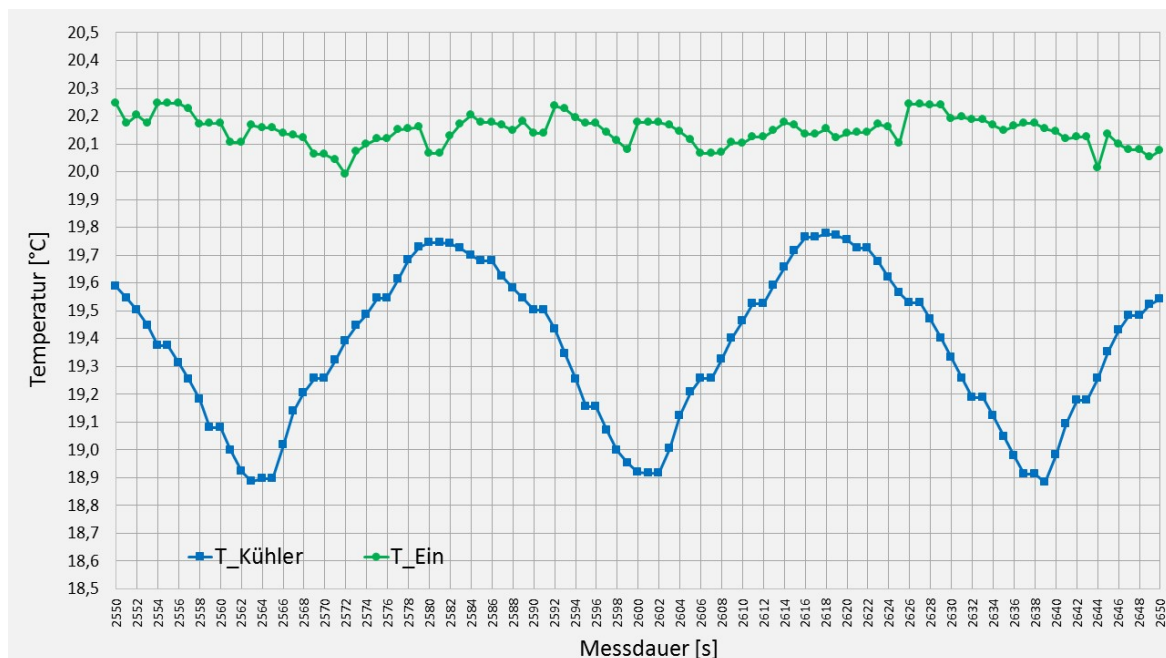


Abbildung 4.13: Verbesserte Konstanz der Eintrittstemperatur

Das Diagramm aus Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf der Kühler Temperatur und den daraus entstehenden Verlauf der Eintrittstemperatur in einem Ausschnitt aus der Messreihe in der ein Delay von 5 s eingestellt war. Die Verbesserung der Temperaturkonstanz wird in dieser Darstellung sehr gut deutlich, zugleich lässt sich aber auch erkennen, dass der geforderte Wert von  $\pm 0,5$  K noch nicht im vollen Maße eingehalten werden kann. Eine exaktere Bestimmung des Delays, sowie eine Verfeinerung der Leistungsberechnung im Rahmen der Erhitzersteuerung könnten jedoch bereits für zufriedenstellende Ergebnisse sorgen.



## 5 Fazit und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein neues Konzept zur Wasserversorgung des Sonnensimulatorprüfstands *OptiRec* zu entwickeln, dieses umzusetzen und in Betrieb zu nehmen. Der Großteil der gestellten Anforderungen wurde dabei erfüllt und soll hier gemeinsam mit den wenigen, noch offenen Punkten, sowie Anregungen zu deren Lösung, abschließend reflektiert werden.

Einen wesentlichen Teil der Wasserversorgung bildet die Receiverhalterung, da sie die Verbindung zwischen dem Leitungssystem und dem zu messenden Receiver darstellt. Auf den mit den Vorgängerprüfständen gemachten und in Abschnitt 2.6.3 beschriebenen Erfahrungen aufbauend, konnte die Receiverhalterung überarbeitet und letztlich neu gefertigt werden. Das Rohrsystem wurde von der alten Halterung übernommen, die Grundstruktur der neuen Halterung basiert jedoch auf demselben Profilsystem wie der Prüfstand, was eine mühelose Integration, sowie Anbringung von Erweiterungen wie Isolation und Strahlungsschutz ermöglicht. Beim Verschlusssystem wurde das anfällige Rohrgewinde durch eine werkzeuglos bedienbare Methode ersetzt. Die einzelnen Elemente des Systems können bei Verschleiß problemlos ersetzt, oder zum Messen von Receivern abweichender Durchmesser gegen entsprechende Varianten ausgetauscht werden. Auch Receiver mit einer Länge von bis zu 5 m können weiterhin gemessen werden, da die vorgegebene Länge eingehalten wurde. Durch den neuen Aufbau konnte die Länge des Halterohres reduziert werden, was gleichzeitig die Distanz zwischen der Temperaturmessstelle und der jeweiligen Receiveröffnung reduziert. Dadurch kann zumindest auf der Austrittsseite auf eine Isolation verzichtet werden, da die Messung der Wassertemperatur noch im Receiver stattfindet. Somit wurde eine den Anforderungen entsprechende Receiverhalterung entwickelt, welche die Bedienbarkeit nochmals vereinfacht, die Messzeit im Vergleich zum *ElliRec* verkürzt und zusätzlich in der Fertigung weniger Kosten verursacht als die alte Version.

Die Halterung konnte erfolgreich einem Drucktest bis 5,7 bar und einem ersten Testlauf unter Messbedingungen unterzogen werden. Für die Überführung in den Messbetrieb ist es zunächst noch notwendig Isolation und Strahlenschutz an der Halterung zu installieren, um diese vor thermischen Störeinflüssen und Beschädigung temperatursensibler Bauteile zu bewahren. Für den allgemeinen Messbetrieb wäre außerdem eine Erweiterung der Halterung von Vorteil, welche das gezielte Abführen des Wassers beim Receiverwechsel ermöglicht. Verschiedene Varianten der Bauteile, welche den Abmessungen der jeweiligen Receivertypen entsprechen müssen, sollten zeitnah für die bekannten Maße gefertigt werden. Die spezifischen Bauteile zum Messen von Receivern zur Direktverdampfung werden bereits erstellt. Die entsprechenden Zeichnungen sind im Anhang angefügt.

Für die eigentliche Wasserversorgung wurde ein Konzept erarbeitet, welches vorsieht das Wasser in einem Kreislauf zu führen, anstelle es aus der Wasserleitung zu entnehmen und am Ende in den Abfluss zu leiten. Dadurch kann der enorme Wasserverbrauch der bisherigen Messungen deutlich reduziert werden. Durch die vom Receiver absorbierte Leistung wird das Wasser erwärmt. Um jedoch eine konstante Eintrittstemperatur zu ermöglichen, wurde ein Kaltwassersatz verbaut, welcher über einen digital geregelten Kältekreislauf die eingetragene Leistung wieder abführt. Da die Temperaturkonstanz von  $\pm 0,5$  K nicht den geforderten

Ansprüchen genügt, wurde zusätzlich ein Strömungserhitzer vorgesehen, welcher die Temperaturschwankungen des Kühlers kompensiert. Eine erste Testmessung ergab eine Erhöhung der Temperaturkonstanz auf etwa  $\pm 0,25$  K, was jedoch nicht dem geforderten Wert von  $\pm 0,1$  K entspricht. Eine mögliche Fehleinschätzung könnte an dieser Stelle die Entscheidung darstellen, den Kaltwassersatz mit einer Regelung auszustatten. Die von dieser Regelung erzeugten Schwankungen machen eine weitere Regelung für den Strömungserhitzer sehr komplex. Wäre die Kälteleistung stattdessen auf einen konstanten Wert gesteuert, so würde dies eine konstantere Abweichung von der Solltemperatur bedeuten, was eine nachträgliche Regelung wiederum erleichtern würde. Aus diesem Grund wurde für den Strömungserhitzer eine Steuerung realisiert, welche die Differenz zwischen der Wassertemperatur am Kühler und der am Receiverintritt ermittelt. Dann wird die zur Korrektur dieser Differenz benötigte Leistung berechnet und ausgegeben. Die Konstanz der Temperatur konnte zwar nicht ausreichend verbessert werden, jedoch ist das Potential der Erhitzersteuerung noch nicht in ganzem Maße ausgeschöpft. Eine genauere Einstellung der Parameter verspricht eine weitere Verbesserung der Konstanz bis auf das geforderte Niveau. Die Durchführung von weiteren, dazu notwendigen Messungen war im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht mehr möglich.

Ein elektrisch angesteuertes Mischventil dient im Wasserkreislauf dazu den vorgegebenen Massenstrom von 850 kg/h vom Messrechner aus problemlos einstellen zu können. Zusätzlich konnten über den somit realisierten Bypass der Druck im gesamten Leitungssystem, sowie der Verschleiß der Pumpe gesenkt werden. Ein positiver Nebeneffekt ist das Einhalten der maximalen Rücklauftemperatur des Kaltwassersatzes aufgrund der Vermischung der beiden Leitungsstränge. Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Parametrierung des Mischventils noch nicht erfolgen. Eine Erhöhung von Stellgenauigkeit und -geschwindigkeit wäre für die Einstellung des Massenstroms von großem Vorteil und sollte definitiv nachgeholt werden.

Die bereits bestehenden Sicherheitsvorrichtungen konnten noch erweitert werden, sodass auch die mit dem Wasserkreislauf neu am Prüfstand verbauten Komponenten davon abgedeckt sind. Außerdem wurde der Datenlogger erweitert, wodurch dieser neben der Erfassung von Messdaten nun auch in der Lage ist steuerungstechnische Aufgaben zu bewältigen. Neben der Steuerung von Mischventil und Strömungserhitzer über das auf *LabVIEW* basierende Überwachungsprogramm, wurde auch eine Ansteuerung der Lampen und des Kaltwassersatzes implementiert, was eine weitere Vereinfachung der Bedienung darstellt und eine gewisse Automatisierung der Messungen ermöglicht.

Der nächste Schritt, um den Wasserkreislauf letztlich in den Messbetrieb zu überführen, ist die Verbesserung der Erhitzersteuerung. Hierzu sollte der Delay angepasst und die Leistungsberechnung verbessert werden. Außerdem sollte die Schlauchleitung von der Temperaturmessstelle am Kaltwassersatz bis zur Receiverhalterung isoliert werden um thermische Störeinflüsse zu minimieren. Zusätzlich könnte noch der Wirkungsgrad des Erhitzers in die Berechnung einbezogen werden. Außerdem sollen Genauigkeit und Geschwindigkeit des Mischventils über die Herstellersoftware verbessert werden. Um die Sicherheit des Prüfstandes weiter zu erhöhen wäre eine Notabschaltung im Falle einer Leckage eine sinnvolle Erweiterung der bestehenden Sicherheitsvorkehrungen.

Um den gesamten Prüfstand *OptiRec* in den Messbetrieb zu überführen und somit letztlich die Reproduzierbarkeit der Messungen im Vergleich zum *ElliRec* zu verbessern, sind



zunächst noch die im Rahmen dieser Arbeit realisierten Weiterentwicklungen am Prüfstand entsprechend in Überwachungs- und Auswertungsmethode zu integrieren, um anschließend im Rahmen einer vergleichenden Messkampagne mit dem Vorgängerprüfstand *ElliRec* eine Validierung des Prüfstands *OptiRec* durchführen zu können.

## Zusammenfassung

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wird über die Auswirkungen des globalen Klimawandels, die steigende Ressourcenknappheit und die daraus resultierende Notwendigkeit der Energiewende auf die Bedeutung von erneuerbaren Energiesystemen, wie konzentrierende Solarthermie, sowie deren Verbesserung hingewiesen. Die Einleitung endet in der Zielsetzung dieser Arbeit, welche die Planung und Umsetzung eines Wasserkreislaufs für den Sonnensimulatorprüfstand *OptiRec* vorsieht. Die Receiverhalterung gilt es in Bezug auf Bedienbarkeit, Flexibilität und Fertigungskosten zu optimieren. Für den Kreislauf soll neben Senkung des Wasserverbrauchs und Erhöhung der Temperaturkonstanz auf  $\pm 0,1$  K, auch Einstellung des Massenstroms und Ansteuerung verschiedener Komponenten per Computer ermöglicht werden.

Mittels CAD wird die Grundstruktur der Receiverhalterung in einer am gesamten Prüfstand verwendeten Profilvertechnik ausgeführt, ein verschleißärmeres Verschlusssystem entwickelt und die Distanz zwischen den Temperaturmessstellen und der jeweiligen Receiveröffnung verringert. Im Anschluss wird die Halterung bei reduzierten Kosten gefertigt, erfolgreich für den Einsatz bei Messungen getestet und im Prüfstand verbaut.

Es folgt die Konzeptionierung des Wasserkreislaufs und die Auslegung und Auswahl der darin vorgesehenen Komponenten. Ein Kaltwassersatz dient zur Rückkühlung des Wassers auf die vorgegebene Eintrittstemperatur am Receiver. Die Temperaturkonstanz des Kühlers ist mit  $\pm 0,5$  K unzureichend und soll durch einen Strömungserhitzer kompensiert werden. Dieser wird an der Eintrittsseite des Receivers, vor der Halterung, positioniert und durch einen Thyristorsteller per Phasenanschnitt stufenlos in seiner Leistung gesteuert. Außerdem wird ein elektrisches Mischventil zum Einstellen des Massenstroms geplant. Für den Datenlogger wird eine Erweiterung vorgesehen, sodass die Ansteuerung der einzelnen Kreislaufkomponenten realisiert werden kann. Der Kreislauf wird der Planung entsprechend umgesetzt. Auftretende Probleme bezüglich des Systemdrucks und der Ansteuerung, über die auf *LabVIEW* basierende Software, können behoben werden. Bei einer ersten Inbetriebnahme des Wasserkreislaufs werden Messdaten zur Bewertung der realisierten Temperaturkonstanz aufgenommen.

Die Arbeit endet mit dem Fazit und der Darstellung der erzielten Ergebnisse. Die Receiverhalterung wurde den Anforderungen entsprechend umgesetzt. Die Bedienung erfolgt werkzeuglos. Die Profilvertechnik der Grundstruktur bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Erweiterung und die Fertigungskosten wurden gesenkt. Für den Messbetrieb sind noch die Isolation und der Strahlungsschutz zu ergänzen. Die geforderte Wassereinsparung wird durch den Kreislauf erreicht. Die Temperaturkonstanz liegt mit einem Wert von  $\pm 0,25$  K zu hoch, kann aber wahrscheinlich durch Anpassungen der Erhitzersteuerung noch weiter gesenkt werden. Die Einstellung des Massenstroms über das Mischventil und die Ansteuerung des Erhitzers, der Lampen und des Kaltwassersatzes erfolgen mittels Datenlogger über den Computer und wurden in der Software implementiert. Damit der *OptiRec* für Messungen genutzt werden kann, sind noch Anpassungen der Mess- und Auswertemethode, sowie die Validierung über eine vergleichende Messkampagne zum *EllRec* nötig.

## Anhang

Im digitalen Anhang befinden sich:

A. Technische Zeichnungen der Bauteile der Receiverhalterung

B. Datenblätter

- a. Klemmhebel
- b. Kaltwassersatz
- c. Datenlogger und Zubehör
- d. Strömungserhitzer
- e. Leistungssteller
- f. Mischventil

C. Schaltplan für den Schaltschrank des *OptiRec*

## Literaturangaben

- [QUA 11] QUASCHNING, V.: Regenerative Energiesysteme - Technologie-Berechnung-Simulation. Hanser Verlag München, 7. Auflage, 2011
- [DES 14] DESERTEC Foundation: Das DESERTEC-Konzept  
Online verfügbar unter: <http://www.desertec.org/de/konzept/>  
(abgerufen am 19.07.2014 14:33:50)
- [BOE 14] BÖHLING, A.: Wüstenstrom - von der Vision zur Wirklichkeit  
Greenpeace e.V., Hamburg, 2009  
Online verfügbar unter: [http://gruppen.greenpeace.de/wuppertal/service\\_files/infoliste\\_files/energie\\_erneuerbare\\_energien/wuestenstrom\\_juli\\_2009.pdf](http://gruppen.greenpeace.de/wuppertal/service_files/infoliste_files/energie_erneuerbare_energien/wuestenstrom_juli_2009.pdf)  
(abgerufen am 19.07.2014 17:22:12)
- [BIN 13] BINE Informationsdienst: Solarthermische Kraftwerke  
Themeninfo II/2013, FIZ Karlsruhe GmbH - Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur, Bonn, 2013
- [PIT 09] PITZ-PAAL, R.: Strategische Ausrichtung des DLR für die Qualitätssicherung solarthermischer Kraftwerke.  
12. Kölner Sonnenkolloquium der DLR-Solarforschung, Köln, 2009
- [DLR 14] Onlineauftritt des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Online verfügbar unter: <http://www.dlr.de/sf>  
(abgerufen am 19.07.2014 18:24:52)
- [VDI 02] VDI Wärmeatlas, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- [ROL 09] Roloff/Matek Maschinenelemente,  
Vieweg und Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [DIB 13] DIBOWSKI, Hans-Gerd: Solarthermie, Vorlesungsunterlagen  
Gastdozent an der Fakultät 09 der FH Köln, Eigenverlag, 2013
- [WEI 11] WEINHAUSEN, J.: Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstandes zur Bewertung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern in solarthermischen Kraftwerke  
Diplomarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Solarforschung, Köln, 2011
- [MIN10] MINICH, W.: Untersuchung von Messmethoden zur Bestimmung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern  
Bachelorarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Solarforschung, Köln, 2010
- [BEN 11] BENZ, N.: SCHOTT Absorberrohr und das DLR als Entwicklungspartner,  
14. Sonnenkolloquium, Jülich, 2011.
- [SCH 09] SCHOTT Solar CSP GmbH: Schott PTR70 Receiver  
Mitterteich, 2009

- [HAP 12] HAPPICH, C.: Konstruktive Auslegung und messtechnische Analyse eines Sonnensimulator-Prüfstandes zur Bewertung der optischen Eigenschaften von Parabolrinnen-Receivern  
Diplomarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Solarforschung, Köln, 2012
- [MAC 08] MACKE, A.: Entwicklung und Konstruktion eines Sonnensimulator-Prüfstandes zur Bestimmung des Wirkungsgrades von Parabolrinnen-Receivern  
Diplomarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Solarforschung, Köln, 2008
- [LIT 10] LITZKE, T.: Optimierung der Messmethoden sowie technische Weiterentwicklung von Prüfständen für Parabolrinnen-Receiver  
Diplomarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Solarforschung, Köln, 2010
- [ANT 12] ANT, P.: Absorberverbiegung und Strömungsbedingungen in einem Sonnensimulator-Prüfstand zur Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern  
Bachelorarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Solarforschung, Köln, 2012
- [KIT 14] Maschinenbau Kitz, Gesamtkatalog der Profilverfahren  
Online verfügbar unter: [http://www.mk-group.com/fileadmin/content/media/ebook\\_catalog/de/pt/index.html#/26/](http://www.mk-group.com/fileadmin/content/media/ebook_catalog/de/pt/index.html#/26/)  
(abgerufen am 25.09.14 13:21:01)
- [HEC 14] HECO gmbh, Gewindefittings und Industriearmaturen  
Online verfügbar unter: <http://www.heco.de>  
(abgerufen am 01.10.14 11:43:21)

## Selbsterklärung und Sperrvermerk

Vor- und Nachname: Fabian Schmitz

Matr.-Nr.: 11075883

Thema der Abschlussarbeit: Auslegung und Inbetriebnahme des Wasserkreislaufs eines  
Sonnensimulatorprüfstandes zum Vergleich des optischen  
Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern

Registrier-Nr.: BA 224/14

### Erklärung gemäß BPO § 25, Satz 1

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen  
als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

### Sperrvermerk

Ich erkläre hiermit, dass meine Abschlussarbeit

- ☐ ausgeliehen
- ☐ nicht ausgeliehen
- ☒ aufgrund einer Auflage der beteiligten Firma bis zum 13.10.2019  
nicht ausgeliehen

werden darf.

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

### Bestätigung

Herrn Fabian Schmitz Matr.-Nr.: 11075883  
wird hiermit bestätigt, dass er seine Abschlussarbeit heute bei mir abgegeben hat.

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift